

Tarja Niemelin
Harri Jyrävä
Marjo Koivulahti

Syvästabiloinnin laboratorikokeiden ohjeistuksen taustaselvitys



Tarja Niemelin, Harri Jyrävä, Marjo Koivulahti

Syvästabiloinnin laboratorio- kokeiden ohjeistuksen taustaselvitys

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 30/2018

Kannen kuva: Tarja Niemelin, Ramboll

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-552-5

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Tarja Niemelin, Harri Jyrävä ja Marjo Koivulahti: Syvästabiloinnin laboratoriokokeiden ohjeistuksen taustaselvitys. Liikennevirasto, tekniikka ja ympäristö -osasto. Helsinki 2018. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 30/2018. 40 sivua ja 3 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-552-5.

Avainsanat: stabilointi, laboratoriotyöt, tiet, ohjeet

Tiivistelmä

Syvästabiloinnin laboratoriomenetelmistä ei ole olemassa kansallista yhtenäistä ohjeistusta. Tämän takia eri laboratorioissa tehtävien stabiloituvuuskokeiden tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia. Tässä selvityksessä on kuvattu syvästabilointiin liittyvien laboratorioiden eroavaisuuksia eri käytäntöjen perusteella sekä tutkittu lähdeaineiston avulla mitkä asiat erityisesti vaikuttavat stabiloituvuuteen.

Taustaselvitystä varten selvitettiin Suomessa toimivien, stabiloituvuuskokeita tekevien laboratorioiden käytäntöjä ja havaittiin että toimintatavoissa on selkeitä eroja, erityisesti runkoaineen homogenisoinnin, tiivistystavan sekä näytteiden varastoinnin osalta. Näillä asioilla on kriittinen merkitys stabiloituvuuskokeiden lopputulokseen. Laboratorioiden väliset erot on havaittu myös vertailukokeissa, kun eri laboratorioissa on tutkittu samaa materiaalia.

Tutkitun lähdeaineiston perusteella tärkeimmät lopputulokseen vaikuttavat tekijät ovat näytteen homogenisointi, tiivistäminen sekä varastointitapa ja -lämpötila. Vuodelta 2010 oleva Syvästabiloinnin suunnittelu, Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet (Liikenneviraston ohjeita 11/2010) tullaan päivittämään. Päivitystä täydennetään laatimalla kokonaan uusi menettelytapaohje syvästabiloinnin laboratoriomenetelmistä. Tässä raportissa on esitetty ehdotus laboratorio-ohjeeseen tulevista asioista ja niiden toimintatavoista. Laboratorio-ohjeistus tehdään tämän taustaselvityksen perusteella. Päätös laboratorio-ohjeen sisällöstä on sovittu syvästabilointiohjeen työryhmän kesken.

Tarja Niemelin, Harri Jyrävä och Marjo Koivulahti: Bakgrundsutredning gällande anvisningar för laboratorieförsök vid djupstabilisering. Trafikverket, teknik och miljö. Helsingfors 2018. Trafikverkets undersökningar och utredningar 30/2018. 40 sidor och 3 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-552-5.

Sammanfattning

Det finns inga nationellt enhetliga anvisningar för laboratoriemetoder vid djupstabilisering. Därför är resultaten från stabiliseringsförsök utförda i olika laboratorier inte helt jämförbara. Denna utredning beskriver skillnaderna, utifrån olika praxis, i laboratoriearbeten som ansluter till djupstabilisering samt undersöker med hjälp av källmaterialet vilka faktorer som särskilt påverkar stabiliseringen.

För bakgrundsutredningen undersökte man praxis i de laboratorier i Finland som utför stabiliseringsförsök, och upptäckte att det finns klara skillnader, i synnerhet gällande homogenisering av stommateriäl, tätningssmetod och lagring av prover. Dessa faktorer är av kritisk betydelse för resultatet av stabiliseringsförsök. Skillnader mellan laboratorierna har också observerats i jämförande försök, när olika laboratorier har undersökt samma materiäl.

Utifrån det undersökta källmaterialet är de viktigaste faktorerna för resultatet homogenisering av provet, tätning samt lagringsmetod och lagringstemperatur. Anvisningen Syvästabiloinnin suunnittelu, Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet från 2010 ("Planering av djupstabilisering, Anvisningar för planering av vägars grundkonstruktioner", Trafikverkets anvisningar 11/2010) kommer att uppdateras. Uppdateringen kompletteras med en helt ny anvisning om förfarande gällande laboratoriemetoder vid djupstabilisering. Denna rapport presenterar ett förslag om vad laboratorieanvisningen ska innehålla och om tillvägagångssätt. Laboratorieanvisningen kommer att utformas utifrån denna bakgrundsutredning. Beslutet om innehållet i laboratorieanvisningen har fattats i en arbetsgrupp för djupstabiliseringsanvisningen.

Tarja Niemelin, Harri Jyrävä and Marjo Koivulahti: Preparatory survey on deep soil stabilisation laboratory test guidelines. Finnish Transport Agency, Engineering and Environment. Helsinki 2018. Research reports of the Finnish Transport Agency 30/2018. 40 pages and 3 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-552-5.

Summary

There are currently no uniform national guideline on laboratory methods for deep soil stabilisation tests. As a result, stabilisability test results between laboratories are not fully comparable. This survey describes the differences in deep soil stabilisation test results based on the differing practices in use at laboratories, and reviews source material in order to identify the crucial factors that affect stabilisability.

The preliminary survey investigated the stabilisation test practices of Finnish laboratories and found clear differences in procedures, particularly in the homogenisation of aggregate, method of compaction, and the storage of samples. These factors have crucial significance on the results of stabilisability tests. The differences were also observed in reference tests conducted in the laboratories using identical test material.

Based on the reviewed source material, the key factors affecting the result are the homogenisation and compaction of the sample, and the storage method and temperature used. The 2010 guidelines on deep soil stabilisation and road foundation planning (Finnish Transport Agency guidelines 11/2010) will be updated. The update will be supplemented by a fully new guideline on laboratory methods for deep soil stabilisation tests. This report presents recommendations for aspects and procedures to be included in the laboratory guideline. The laboratory guideline will be compiled on the basis of this preliminary survey. The content of the laboratory guideline has been agreed by the deep soil stabilisation workgroup.

Esipuhe

Tämä selvitys on osa Liikenneviraston Syvästabiloinnin suunnittelu -ohjeen päivitystyötä. Ohjepäivitystä täydennetään laatimalla kokonaan uusi menettelytapaohje syvästabiloinnin laboratoriomenetelmistä. Laboratorio-ohjeistus tehdään tämän taustaselvityksen perusteella. Taustaselvityksen on tehnyt Ramboll Finland Oy vastuuhenkilönään Marjo Koivulahti.

Syvästabilointi ohjetyön työ- ja ohjausryhmään kuuluivat Liikennevirastolta Veli-Matti Uotinen (tilaaja) ja Panu Tolla, Aalto-yliopistosta Leena Korkiala-Tanttu, VR Trackilta Seppo Hakala ja Ramboll Finland Oy:stä Juha Forsman, Juho Mansikkamäki sekä Marjo Koivulahti.

Helsingissä huhtikuussa 2018

Liikennevirasto

Tekniikka ja ympäristö -osasto, Tietekninen yksikkö

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	8
2	SELVITYKSEN PERIAATTEITA JA LÄHTÖAINEISTOA	9
2.1	Selvityksen periaatteet.....	9
2.2	Kirjallisuus.....	9
2.3	Kansalliset laboratoriokäytännöt nykyisin	11
2.4	Menettelytapojen eroavaisuuksia lähdeaineistojen perusteella	14
3	LUJUUSKEHITYKSEEN VAIKUTTAVAT ASIAT	16
3.1	Laboratoriotutkimusten ohjelmointi.....	16
3.2	Näytteenotto.....	16
3.3	Maalaji	16
3.3.1	Savet ja siltit	17
3.3.2	Sedimentit	17
3.3.3	Turpeet	17
3.3.4	Sulfidisavet.....	17
3.4	Sideaineet	18
3.4.1	Yleistä	18
3.4.2	Sementti.....	18
3.4.3	Kalkkituotteet	19
3.4.4	Palavan kiven tuhka	19
3.4.5	Muut sideainekomponentit	19
3.5	Sekoittaminen	20
3.6	Tiivistys	22
3.7	Lämpötila, varastointi ja esikuormitus.....	27
3.8	Puristuslujuuden määrittäminen.....	32
4	EHDOTUKSIA TOIMINTATAVOIKSI	33
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	39
	LÄHTEET	40
	LIITTEET	
Liite 1	Laboratorioille lähetetyt kysymykset	
Liite 2	Lämpötilan kehitys pitkällä aikavälillä	
Liite 3	Kaavio tiivistystavan valinnalle	

1 Johdanto

Syvästabilointia (massa- ja pilaristabilointia) on käytetty menestyksekkäästi infrarakentamisen sovellutuksissa jo yli 20 vuoden ajan, ja tulevaisuudessa menetelmää tullaan todennäköisesti hyödyntämään yhä useammin sen tarjoamien etujen ja mahdollisuuksien vuoksi. Stabilointityön onnistumiseksi, ennen varsinaista rakentamista, tarvitaan kattavat laboratoriotutkimukset sideainetyypin ja -määrän optimoimiseksi jotta asetettu tavoitelujuus saavutetaan. Tavoitelujuus määräytyy usein myös vasta laboratoriokeiden perusteella. Stabiloituvuustutkimuksia tehdään useammassa laboratoriossa Suomessa, mutta yhteistä ohjeistusta ei ole ollut käytössä. Laboratorioiden nykyiset tutkimusmenetelmät perustuvat vakiintuneisiin käytäntöihin, kokeemukseen ja tutkimustietoon. Pitkästä kokemuksesta huolimatta laboratoriotuloksissa on havaittu huomattavaakin vaihtelua samojen näytteiden kesken eri laboratorioiden tutkimuksissa. Tulosten laadun ja vertailukelpoisuuden varmistamiseksi on päätetty laatia kansallinen syvästabiloinnin laboratorio-ohjeistus, joka tulee syvästabiloinnin suunnitteluohjeen liitteeksi.

Taustaselvityksen tarkoituksena on muodostaa käsitys siitä, mitä syvästabiloinnin laboratoriotöiden menettelytapaohjeen tulee sisältää, ja tämän raportin pohjalta laaditaan yhtenäinen ohjeistus noudatettavaksi kansallisesti stabilointitutkimuksissa. Raportti on osa syvästabilointiohjeen päivityskokonaisuutta.

2 Selvityksen periaatteita ja lähtöaineistoa

2.1 Selvityksen periaatteet

Kansallista syvästabiloinnin laboratorio-ohjetta varten selvitettiin kansallisen ja kansainvälisen kirjallisuuden pohjalta erilaisia laboratoriokäytäntöjä, joiden perusteella tämä taustaselvitysraportti on laadittu. Raportissa käsitellään selvityksessä esiin tulleita asioita, joilla on vaikutusta stabilointikokeiden tuloksiin.

Kirjallisuudesta tutkittiin myös märkämenetelmää koskevia käytäntöjä, vaikka sitä voi soveltaa syvästabilointiohjeeseen rajoitetusti.

2.2 Kirjallisuus

Raportin lähdeaineistona käytettiin kansallista ja kansainvälistä kirjallisuutta sekä henkilöhaastatteluja. Käytetty kirjallisuus käsitti sekä julkaisuja että konferenssiartikkeleita.

Laajemmin stabilointimenetelmää, suunnitteluperiaatteita, eri muuttujien vaikutuksia stabiloituvuuteen, käytäntöjä työmaalla sekä laboratoriossa on käsitelty seuraavissa julkaisuissa:

- EuroSoilStab – Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils. 2010. Design Guide for Soft Soil Stabilisation. CT97-0351. Project No.: BE 96-3177.
- Larsson, R. 2006. Djupstabilisering med bindemedelsstabiliserade pelare och masstabilisering. Rapport 17. Svensk Djupstabilisering (SD). ISSN 1402-2036.
- Kitazume, M. ja Terashi, M. 2013. The Deep Mixing Method. CRC Press/Balkema. ISBN: 978-1-138-00005-6 (Hbk). ISBN: 978-0-203-58963-2 (eBook)
- Forsman, J. et al. 2014. Massastabilointikäsikirja

EuroSoilStab

Julkaisu on suunnitteluopas, joka on tarkoitettu kaikille syvästabilointitekniikan parissa työskenteleville. Julkaisun on tarkoitus auttaa rakennusteknisissä ongelmissa ja selvittää syvästabilointimenetelmän periaatteita. EuroSoilStab käsittelee sekä pilaristabilointia että massastabilointia sekä niissä käytettävien sideaineseosten suunnittelua. Julkaisussa käsitellään myös tutkimukset, jotka ovat tarpeellisia sekä työmaalla että laboratoriossa stabilointisuunnitelman laatimiseksi. Urakoitsijalle julkaisu tarjoaa myös laitetietoutta. Lisäksi julkaisussa käsitellään rakennustapoja sekä laadunvalvontamenetelmiä. Julkaisu on tuotettu eurooppalaisessa EuroSoilStab-projektissa, ja se on saanut rahoitusta Brite-EuRam III-ohjelmasta. Suomalaiset laboratoriokäytännöt noudattelevat pitkälti EuroSoilStab-opasta.

Djupstabilisering med bindemedelsstabiliserade pelare och masstabilisering

Ruotsalaisen syvästabilointijulkaisun on tuottanut ruotsalainen yhteistyöverkosto Svensk Djupstabilisering (SD), joka toimi vuosina 1995-2006 Ruotsin Statens Geotekniska Institutet (SGI) alaisuudessa. Svensk Djupstabilisering tutki ja kehitti syvä- ja massastabilointia yhteistyössä viranomaisten, kalkki- ja sementtitoimittajien, yrittäjien, konsulttien, tutkimuslaitosten ja korkeakoulujen kanssa. Julkaisun on kirjoittanut Rolf Larsson SGI:stä.

The Deep Mixing Method

Japanilainen The Deep Mixing Method julkaisu on kahden japanilaisen stabiloinnin ammattilaisen, Masaki Kitazumen ja Masaaki Terashin, kirjoittama opas syvästabilointiin vuodelta 2013. Julkaisu on ennemminkin tietokirja kuin käytännön manuaali. Julkaisussa käsitellään syvästabiloinnin lujuuskehitykseen vaikuttavia asioita, stabiloidun maan ominaisuuksia, sovellutusten eri variaatioita, suunnittelumenetelmiä, laadunvalvontametodeja sekä Japanissa 40 vuoden aikana omaksuttuja käytäntöjä. Huom. julkaisussa käsitelty menetelmä on märkämenetelmä "wet method", jossa sideaine sekoitetaan veden kanssa lietteeksi ennen sekoittamista näytteeseen.

Massastabilointikäsikirja

Massastabilointikäsikirja valmistui vuonna 2014 ja se tuotettiin edistämään menetelmän hyötykäyttöä jakamalla perustietoa massastabilointimenetelmästä, laitteistosta, sideaineista, sovellutuksista, tutkimuksista, suunnittelusta sekä rakentamisesta ja laadunhallinnasta. Käsikirja toteutettiin alalla toimivien yritysten tuella (ALLU Stamix Oy, Certification Center CTCR Oy / RuSol, Finnsementti Oy, Lemminkäinen Infra Oy, Nordkalk Oy ja Ramboll Finland Oy). Massastabilointikäsikirjan ovat kirjoittaneet Juha Forsman, Harri Jyrävä, Pentti Lahtinen, Tarja Niemelin ja Iikka Hyvönen.

Raporttia varten taustatietoa on luettu myös seuraavat artikkelit läpi:

- Balasubramaniam, A.S, Buessucesco, B., Oh, E.Y.N, Bolton, M., Bergado, D.T., Lorenzo, G.A. 2005. Strength degradation and critical state seeking behaviour of lime treated soft clay
- Jacobson, J.R., Filz, G.M., Mitchell, J.K. 2005. Factors Affecting of Lime-Cement Columns Based on a Laboratory Study of Three Organic Soils.
- Jeong, G.H., Shin, M.S., Han, G.T., Lee, J.H, Kim, J.H. 2009. Studying for Lab Mixing Test of Task 2 in Korea
- Eggen, A., Jensen, T.G. ja Karlsrund, K. 2011. Veiledning for grunnforsterkning med kalksementpeler. Luonnosversio (?) syyskuu 2011. Norsk Geoteknisk Forening.
- Karlstedt, P. ja Halkola, H. 1993. Tiedote 61/1993. Ylijäämäsavien massa-stabilointi. Helsingin kaupunki. Kiinteistövirasto. Geotekninen osasto.
- Kitazume, M. ja Nishimura, S. 2009. Influence of specimen preparation and curing conditions on unconfined compression behaviour of cement-treated clay (huom. märkämenetelmä?)
- Kitazume, M. & Nishimura, S., Terashi, M. ja Ohishi, K. 2009. International Collaborative Study Task 1: Investigation into Practice of Laboratory Mix Tests as Means of QC/QA for Deep Mixing Method (huom. märkämenetelmä)
- Kitazume, M., Ohishi, K., Nishimura, S. ja Terashi, M. 2009. International Collaborative Study Task 2 Report: Interpretation of comparative test program (huom. märkämenetelmä)
- Koseki, J., Sato, T., Mihira, S., Takeya, N., Yoshizawa, M. 2005. Comparison of tensile strength of cement treated sand by various test methods. (huom. Märkämenetelmä)
- Marzano, I.P., Al-Tabbaa, A. ja Grisolia, M. 2009. Influence of sample preparation on the strength of cement-stabilised clays
- Standardi SFS-EN 14679. Vahvistettu 30.05.2005. Pohjarakennustyöt. Syvästabilointi. Execution of special geotechnical works. Deep mixing. Suomen standardisoimisliitto SFS.

- Standard ISO/DIS 17892-7. Draft international standard. Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 7: Unconfined compression test.
- Syvästabiloinnin suunnittelu. Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. 2010. Liikenneviraston ohjeita 11/2010. Liikennevirasto. Helsinki.
- Timoney, M.J., McCabe, B.A., ja Bell, A.L. 2012. Experiences of dry soil mixing in highly organic soils. Ground Improvement. Volume 165. Issue GI1.
- Åhnberg, H & Holm, G. 2009. Influence of laboratory procedures on properties of stabilised soil specimens.
- Åhnberg, H. ja Andersson, M. 2015. Laboratory testing of stabilised Swedish soils prepared with different moulding techniques (märkämenetelmä)

On huomattava, että vaikka aiheen tiimoilta on kirjoitettu artikkeleita, koskevat artikkelit yleensä varsin rajattua testisarjaa ja koejärjestelyn tulokset koskevat ainoastaan tutkittuja kappaleita. Näiden tulosten perusteella ei voi tehdä yleisiä johtopäätöksiä koskemaan kaikkia stabiloituvuuskoekappaleita, vaan tuloksia on pyritty hyödyntämään lähinnä tehtyjä toimintatapaehdotuksia tukevana/tarkentavana aineistona.

Henkilöhaastatteluilla selvitettiin eri laboratorioiden käytäntöjä. Kysymykset lähetettiin Staralle (Jukka Naukkarinen), Mitta Oy:lle (Minna Löytynoja) sekä Harri Jyrävälle (Ramboll Finland). Laboratorioille lähetetyt kysymykset on esitetty liitteessä 2.

2.3 Kansalliset laboratoriokäytännöt nykyisin

Tätä taustaraporttia varten selvitettiin Suomessa toimivien geoteknisten laboratorioiden stabilointikokeiden käytäntöjä. Huomiota kiinnitettiin erityisesti maanäytteen ja sideaineen sekoittamiseen, sekoitusaikaan, muotin kokoon ja näytteen tiivistämiseen muottiin, varastointilämpötilaan sekä lujittumisaikaan. Taulukossa 1 on esitetty erilaisia nykyisin käytössä olevia vaihtoehtoja laboratoriokäytännöille tehtävän eri vaiheissa.

Taulukko 1. Laboratoriokäytäntöjen vaihtoehtoja.

Vaiheet	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 3
Runkoaineiden säilytys	Kylmässä, noin 24 h ennen työn aloitusta tuodaan huoneenlämpöön	Huoneenlämmössä	Kylmässä, noin 7 °C
Runkoaineiden homogenisointi	Homogenisoidaan kauttaaltaan, myös isot näytteet. Mikäli samaa näytettä useammassa näyteastiassa, näytteet yhdistetään ja homogenisoidaan.	Jokaisesta näyteämpäristä otetaan näytettä ja sekoitetaan taikinakoneella tasaiseksi ennen sideaineen sekoitusta joukkoon.	Ennen näytteiden valmistusta porakonevispilällä saavissa
Näytteen lämpötila kun sekoitus-työ alkaa	Huoneenlämpötila	Huoneenlämpötila	Runkoaine otetaan suoraan kylmiöstä käyttöön, mutta lämpötila voi nousta valmistuksen aikana
Sideaineiden säilytys ja maksimi-ikä	Säilytys kuivassa ja tiiviissä astiassa, max käyttöikä 6 kk	Säilytys kuivassa ja tiiviissä astiassa, max. käyttöikä noin 12 kk	
Sekoittimen tyyppi	Taikinasekoitin	Teollisuustaikinasekoitin	Taikinasekoitin pieniin määriin, porakonevispilä + saavi suurille määriille
Sekoitus aika	2 min	Noin 2 minuuttia tai kunnes on sekaisin kunnolla (silmämääräinen arvio)	Ei määritetty, sekoitetaan kunnes seos on silmämääräisesti sekoittunut homogeeniseksi
Koekappaleiden määrä	Yleensä 2–3 rinnakkaista koekappaletta	Yleensä 2 rinnakkaista koekappaletta	3 koekappaletta
Muotinkoko	Halkaisija 42–50 mm, turvekappaleilla 68 mm	Sisähalkaisija noin 50 mm, korkeus noin 160 mm (ei täytetä täyteen)	Halkaisija 50 mm, korkeus 170 mm, metalliputki jonka sisäpinta on suihkutettu silikonispraylla
Tiivistystapa	Riippuen materiaalista joko käsin sullomalla, pöytään taputtelemalla tai tiivistyskepin avulla	Tiivistys kerroksittain puisella tasapäisellä ”nuijalla”/survimella. Tarvittaessa käytetään myös pienempää puunuijaa tiivistämiseen etenkin reunoissa.	Tiivistys sullomalla metallipunttia tai puunuijaa käyttäen, sullominen 10–15 kertaa per kerros riippuen materiaalin käyttäytymisestä, 5 sullontakerrosta. Hyvin löyhille seoksille käytetään seulatärytintä.
Tiheyden mittaus	Ei	Ei	Kyllä, valmistuksen yhteydessä

Vaiheet	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 3
Putkien sulkeminen	Löysien materiaalien tapauksessa alaosa teipataan umpeen, muuten putki laitetaan muovipussiin.	Putket suljetaan molemmista päistä muov-/kumikorkeilla. Alapäässä on lisäksi muovikalvo korkin suojana. Putkeen jää yleensä noin 2–3 cm ilmatila.	Päihin muovilätkät ja suljetaan kumisilla umpikorkeilla
Koekappaleiden säilytys	2 vrk lämpöeristetyssä laatikossa huoneenlämmössä sideainetyypeittäin eroteltuina, sen jälkeen nostetaan kylmiöön ja otetaan laatikon kansi pois. Turvekappaleet 18 kPa esikuormituksella huoneenlämmössä 20 °C (± 2 °C).	Yleensä 2 vrk huoneenlämmössä laboratorio-tiloissa, joissa lämpötila säilyy hyvin vakiona (noin 22 °C).	Vesialtaassa (ämpäri-ssä): -2 viikon ajan, jos ne sisältävät kalkkia -1 viikon ajan, jos eivät sisällä kalkkia Allassäilytyksen jälkeen kosteushuoneeseen (+ 8 °C) ilman vesiallasta.
Säilytyslämpötila	Huoneenlämpö / 8 °C	Huoneenlämpö / 7 °C	Huoneenlämpö / 8 °C
Puristettavan kappaleen koko	Halkaisija 42/50/68 mm, korkeus 2 x halkaisija	Halkaisija noin 50 mm putkesta riippuen. Katkaistaan 100 mm korkeiseksi.	Näytteen korkeus 112 mm (halkaisija 50 mm)
Puristusnopeus	1 mm/min, turpeet 2 mm/min	0,9 mm/min, tilaajan pyynnöstä nopeus voi vaihdella	0,2 mm/min
Voima-siirtymädatan tallennus	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Lujuuden korjaus muotosuhteen muuttuessa	Ei	Ei	Ei
Moduulien laskenta		Kimmomoduuli E50	Ohjelma ilmoittaa maksimijännityksen ja sekanttimoduulin
Mitä tietoja Koekappaleesta ilmoitetaan	Lujittumisikä, sideaine, sideainemäärä, syvyystieto, tilavuuspaino, puristusnopeus, maksimijännitys, millä kokoonpanopuristuma-%:lla saavutetaan, kimmoduuli, koepäivä	Lujittumisikä, sideaine, sideainemäärä, syvyystieto, tilavuuspaino, puristusnopeus, maksimijännitys, millä kokoonpanopuristuma-%:lla saavutetaan, kimmoduuli, koepäivä, tulostiedoston nimi	Tiheys, puristusnopeus, ikä
Jännitys-muodonmuutoskuvaajien toimitus	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Tulosten merkintä	Kokonaisina kilopascaleina (kPa)	Kokonaisina kilopascaleina (kPa)	kPa yhden desimaalin tarkkuudella

2.4 Menettelytapojen eroavaisuuksia lähde- aineistojen perusteella

Tässä kappaleessa käsitellään pääasiassa eroavaisuuksia EuroSoilStab, Djupstabilisering sekä The Deep Mixing Method-ohjeistusten välillä, koska nämä ovat muodostuneet tietyllä tapaa vakiintuneiksi käytännöiksi. The Deep Mixing Method on märkämenetelmä, jossa sideaine lietetään ensin veteen ennen sekoittamista maa-ainekseen, joten se ei ole suoraan verrannollinen kahden muun ohjeistuksen kanssa. Märkämenetelmä on kuitenkin otettu tarkasteluun mukaan siltä varalta, että se sisältää sellaisia tapoja jotka voisivat hyödyttää myös kuivamenetelmää.

Ohjeistukset ovat monilta osin väljiä, mm. näytteen homogenisoinnin ja varsinaisen stabilointinäytteen sekoituksen sekä siihen käytettävän ajan suhteen. Käytettävät sekoittimet voivat olla kotitalouskäyttöön tarkoitettuja monitoimikoneita tai järeämpiä taikinasekoittimia. The Deep Mixing Method ohjeistaa ainoastaan, että sekoittimen kulhon tilavuuden tulee olla 5 000–30 000 cm³. Vain EuroSoilStab-ohjeessa on kerrottu millaisella näytteenottimella maanäyte tulisi ottaa.

Maanäytteen homogenisointiin EuroSoilStab ohjeistaa poistamaan juurten palaset, suuret kuidut ja karkeat materiaalit, mikäli mahdollista ja maanäytettä sekoitetaan, kunnes se on visuaalisesti homogeenista. Mikäli maanäyte on kuituista turvetta, sekoitusaikaa tulee rajoittaa, jotta kuidut eivät tuhoudu. Kahdessa muussa ohjeistuksessa ei ohjeisteta maanäytteen homogenisointia.

Muottien koot on määritetty kaikissa tarkasteltavissa ohjeistuksissa. EuroSoilStab ohjeistaa pilaristabiloinnin koekappaleiden muottien kooksi halkaisijaltaan 50 mm ja korkeudeltaan vähintään 100 mm muotin ja massastabiloinnin koekappaleiden muottien kooksi halkaisijaltaan 68 mm ja korkeudeltaan 200–300 mm (koskee lähinnä turvekappaleita). Ohje antaa tulkintavaraa: ”Muotin halkaisija valitaan sekoitetun näytteen karkeuden mukaan. Useimmissa tapauksissa d68 mm on riittävä. Mikäli näyte sisältää paljon karkeita partikkeleita tai kuituja, halkaisijan tulisi olla suurempi” (EuroSoilStab). Djupstabilisering-ohjeen mukaan pilaristabiloinnin koekappaleiden muottien halkaisija on 50 mm ja korkeus 170 mm. Massastabiloinnin koekappaleiden muotin halkaisija on 70 mm ja korkeus 200 mm (Djupstabilisering). The Deep Mixing Method ohjeistaa, että mikäli maanäyte on savista tai hiekaista, käytetään alle 50 mm muottia ja mikäli maanäytteessä on paljon soraa/kasvinosia, käytetään yli 50 mm muottia. Joka tapauksessa koekappaleen korkeus on 2–2.5-kertainen halkaisijaan nähden. (The Deep Mixing Method)

Mitä tulee varsinaisen stabiloinnin koekappaleen, eli maanäytteen ja sideaineen sekoittamiseen, ohjeet antavat sekoitusajaksi 2–5 minuuttia. EuroSoilStab-ohjeessa pilaristabiloinnin koekappaleiden osalta sanotaan, että maa-ainesten ja sideaineiden ominaisuuksien eroavaisuuksien takia on mahdotonta määrittää tiettyä sekoitusaikaa, mutta 5 minuutin sekoitusaika on suositeltava silloin kun mahdollista. Massastabiloinnin koekappaleiden osalta EuroSoilStab ohjeistaa 2–5 minuutin sekoitusajan. Djupstabilisering-ohjeen mukaan maanäytettä ja sideainetta sekoitetaan alle 5 minuuttia, kunnes seos on homogeenista. Turpeen sekoitusajaksi ohjeistus on 2–5 minuuttia. The Deep Mixing Method-ohjeistuksessa ensin sekoitetaan nopeasti käsin, jonka jälkeen koneella 5 minuuttia. Esimerkki sekoittajasta on esitetty kuvassa 1.



Figure A.2 Electric mixer.



(a) Hook type.



(b) Flat type.



(c) Whipper type

Kuva 1. Esimerkki sekoittajasta ja siinä käytettävistä teristä japanilaisen *The Deep Mixing Method*-ohjeistuksen mukaan.

Ohjeistusten eroavaisuudet on tarkemmin koottu taulukkoon, joka on esitetty liitteessä 1.

3 Lujuuskehitykseen vaikuttavat asiat

3.1 Laboratoriotutkimusten ohjelmointi

Laboratoriotutkimuksen perustana ovat kattavat pohjatutkimustiedot alueelta. Myös aiemmin tehdyt pohjatutkimukset samalla alueella on otettava huomioon stabiloitu-vuustutkimuksia ohjelmoitaessa. Ohjelmointi tehdään aina kokonaisuus ja tavoitelu-juuden suuruusluokka huomioiden. Oletuksena onnistuneeseen ohjelmointiin ja sitä myöten myös luotettaviin laboratoriotuloksiin on edustavat pohjatutkimustiedot ja oi-kein tehty näytteenotto.

3.2 Näytteenotto

Onnistuneen stabiloituvuustutkimuksen tärkein lähtökohta on näytteenotto. Näytteen tulee edustaa tutkittavan alueen keskiarvotasoa ja sen kerroksia, lisäksi myös ääripää-t tulee olla edustettuna. Tarvittaessa näytteitä otetaan useasta pisteestä ja useammalta syvyystasolta – riittävät pohjatutkimustiedot ja niiden huolellinen tulkinta on oleellista koko stabiloituvuustutkimuksen kannalta. Stabiloituvuustutkimuksissa ei voi määri-tellä luotettavasti sideainereseptiä, mikäli näytteenotto on tehty puutteellisesti eli epä-onnistunut näytteenotto vaarantaa koko stabilointiprojektin. Mitoitus tehdään aina heikoin paikka huomioiden. Tässä raportissa ei oteta tarkemmin kantaa näytteenotto-tapoihin ja muihin näytteenoton detaljeihin, sillä laboratoriotyö alkaa siitä, kun näyt-teet on toimitettu työn suorittavalle laboratoriolle.

Näytteenotto tulee tehdä niin, että näytepisteen kerrokset eivät pääse sekoittumaan. Tämä on tärkeää kaikilla maalajeilla, mutta aivan erityisen tärkeää ruoppausmassojen ja turpeiden näytteenotossa. Olennaista on myös huomioida kerrospaksuudet ja ha-vainnot kerroksista, niiden rajapinnoista, vesipinnasta, jne. Kerroksessa oleva vesi ei saa valua pois näytettä otettaessa ja toisaalta lisävettä ei myöskään saa tulla mukaan näytteeseen. Runkomateriaalinäytteiden ominaisuuksia tulee verrata muihin alueen pohjatutkimustietoihin ja lisäksi tarvittaessa on harkittava, kuivataanko näytettä tai li-sätäkö siihen vettä (veden laatu tulee myös huomioida).

Laboratio-ohjetta varten pohdittavia asioita:

- näytteenoton kattavuus/näytepisteiden määrä
- näytteenoton laadun varmistaminen
- näytteiden jäljitettävyys

3.3 Maalaji

Näytteitä kuljetettaessa laboratorioon materiaalien jäätyminen tulee estää. Kuljetuk-sen aikana näytteestä voi myös erottua vettä, jota ei saa poistaa vaan se on homogeni-soitava näytteeseen mukaan laboratoriotöiden alkaessa.

3.3.1 Savet ja siltit

Savien ja silttien käsiteltävyyteen stabiloituvuustesteissä vaikuttaa erityisesti niiden vesipitoisuus. Mikäli vesipitoisuus on alhainen, sideainetta sekoitettaessa kuiva savi tai siltti muuttuu helposti murumaiseksi. Tämä vaikuttaa näytteen tiivistyvyyteen sekä sideaineen sekoittumisen tasalaatuisuuteen, sillä murumaiseen seokseen jää helposti koloja/ilmarakoja jotka taas vaikuttavat lopulliseen puristuslujuustulokseen.

Mikäli savi on kovaa, sen homogenisointi on haasteellista ja aikaa vievää. On myös mahdollista, että laboratoriossa kovaa savea ja sideainetta ei saa sekoitettua tasaisesti. Tällaisessa tilanteessa asia huomioitava/kirjattava myös tulosraporttiin, sillä saven laatu voi vaikuttaa oleellisestikin työn käytännön toteuttamiseen.

3.3.2 Sedimentit

Sedimenteillä tarkoitetaan tässä yhteydessä vesistön pohjasta ruopattuja massoja. Sedimenttien näytteenotossa tulee noudattaa erityistä huolellisuutta, jotta näytteen vesipitoisuus ei oleellisesti muutu. Liiallinen vesi huonontaa stabiloituvuutta, kun taas todellisuutta alhaisempi vesipitoisuus antaa paremman stabiloituvuustuloksen. Runkomateriaalinäytteiden tulee edustaa koko ruopattavaa kerrosta.

3.3.3 Turpeet

Turpeiden stabiloituvuuteen vaikuttavat monet muuttujat. Turpeiden vesipitoisuudet vaihtelevat suuresti, niiden orgaanisen aineksen osuus on suuri ja ne ovat usein pH-pitoisuudeltaan happamia. Näiden lisäksi turpeen maatuneisuusaste vaikuttaa sen stabiloituvuuteen.

Turpeiden näytteenotossa on oltava erityisen huolellinen, sillä turpeiden todellinen vesipitoisuus ja turpeiden laatu voi vaihdella hyvin voimakkaasti kerroksittain. Turvestabiloinnin yhteydessä tulee myös pohdittavaksi, sekoittuuko/sekoitetaanko joku toinen kerros turpeeseen stabilointityön yhteydessä.

3.3.4 Sulfidisavet

Sulfidimaat käsittävät maalajeja savesta aina hiekkaan saakka. Näiden käsiteltävyys vastaa kyseisten maalajien käsittelyä. Käsittelyssä ja erityisesti näytteenotossa ja näytteiden säilytyksessä tulee huomioida sulfidimaille tyypillinen piirre. Näytteiden päästessä kosketuksiin ilmakehän hapen kanssa näytteiden rikkiyhdisteen alkavat hapettua. Prosessin yhteydessä näytteen pH-taso muuttuu ja tästä syystä näytteen pH on suositeltavaa mitata heti maastossa. pH-mittauksen tarkoituksena on selvittää hapettuneen kerroksen raja, ja antamaan lähtötieto myös kuljetuksen ja näytteen säilytyksen ajaksi. Mittaukseen riittää kenttämittarin tarkkuus (??). Sulfaattimaanäytteet tulee pakata maastossa ilmatiiviisiin astioihin tai pusseihin ja kuljettaa analysoivaan laboratorioon viilennettyinä. Astioihin pakatessa näytteen voi tarvittaessa suojata esimerkiksi erillisellä muovilla ja pussiin pakatessa ylimääräinen ilma täytyy päästää pois. Laboratoriossa näytteet säilytetään viileässä ja ilmatiiviisti. Vesipitoisuusmäärittämisessä ja pH-mittauksissa osanäyte pyritään ottamaan näytteen sisältä, jossa hapettuminen ei ole edennyt niin pitkälle kuin näytteen ulkoreunalla.

Sulfidisavissa ja -silteissä voi esiintyä mustaa väriä ilmentämään sulfideja, mutta näin ei kuitenkaan aina ole. Näytteen väri voi olla myös tasaisen harmaa. Runkomateriaalina sulfidisavet tulee säilyttää tiiviissä astioissa ja viileässä lämpötilassa. Näytteen edustavuuden ja säilytysajan voi selvittää pH-mittauksin. Jos näytteen pH on muuttunut alkuperäisestä, näyte ei enää edusta alkuperäistä näytettä ja stabiloituvuustulokset voivat muuttua olennaisesti uusintatestauksen yhteydessä.

Valmistettaessa koekappaletta sulfidipitoisesta maa-aineksesta, tulee kaikkea ylimääräistä kontaktia hapen kanssa välttää. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että runkoainetta ei käsitellä, eikä avata säilytysastioita tarpeettomasti ja koekappaleen valmistamisen jälkeen kappale suljetaan välittömästi tiiviiseen muovipussiin.

Laboratorio-ohjetta varten pohdittavia asioita:

- Runkoaineiden varastointilämpötila
- Runkoaineiden lämpötila, kun näytteiden teko alkaa
- Homogenisointi
- Tarkempi ohjeistus sulfidisaville

3.4 Sideaineet

3.4.1 Yleistä

Sementti on massastabiloinnin yleisimmin käytetty sideaine, mutta myös kalkkisementin tai GTC-sideaineen käyttö on usein mahdollista. Sementin ja kalkin lisäksi voidaan käyttää sideaineseoksen osakomponentteina erilaisia teollisuuden sivutuotteita kuten kuonia, lentotuhkia ja/tai kipsimäisiä aineita. Teollisuuden sivutuotteilla voidaan vaikuttaa positiivisesti stabiloitujen massojen tekniseen ja/tai ympäristölliseen laatuun sekä sideainekustannuksiin (Forsman, J. et. al.).

Sideaineen valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat saavutettavan lujuustason, materiaalihinnan ja saatavuuden lisäksi mm. lujittumisnopeus, jännitys-muodonmuutosominaisuudet sekä mahdollisesti myös vaikutukset liukoisuus- ja vedenläpäisyominaisuuksiin (Forsman, J. et. al.).

3.4.2 Sementti

Sementti on massastabiloinnissa yleisimmin käytetty sideainetyyppi, pilaristabiloinnissa sitä harvemmin käytetään yksinään. Sementeillä saavutetaan yleensä muita sideaineita parempi alkulujittuminen, mikä on monissa tapauksissa oleellista työn toteutuksen kannalta. Sementin pitkäaikaislujittuminen on puolestaan yleensä pienempää kuin muilla sideaineilla (Forsman, J. et. al.).

Sementeillä kalsiumionien liikkuminen (diffusioituminen) runkoaineessa on vähäistä, joten pelkän sementin sekoittumisessa runkoaineeseen mahdollisesti esiintynyt epähomogeenisuus ei juurikaan korjaannu sekoitushetken jälkeen. Tämän takia sementtiä käytettäessä sekoitustyön laatu näkyy lopputuloksessa jonkin verran voimakkaammin kuin kalkkipitoisia sideaineita käytettäessä (Forsman, J. et. al.).

Stabiloinnissa käytettyjä sementtituotteita ovat standardin EN 197-1 mukaisesti: Plussementti (CEM II/B-M (S-LL*) 42,5 N), Rapidsementti (CEM II/A-LL 42,5 R), Pikasementti (CEM I 52,5 R) ja SR-sementti (CEM I 42,5 N-SR3). SR-sementti soveltuu sulfaattipitoisen maaperän stabilointiin. (Forsman, J. et. al.), mutta sementin soveltuvuus täytyy tutkia tapauskohtaisesti.

3.4.3 Kalkkituotteet

Stabiloinnissa käytetään lähinnä poltettua (CaO), joskus myös sammutettua kalkkia (Ca(OH)₂). Kalkkituotteita käytetään lähes aina stabiloinnin yhteydessä muiden sideaineiden, useimmiten sementtien, kanssa seostettuna. CaO on hyvin reaktiivinen sideaine, ja se sitoo erittäin tehokkaasti vettä. Reaktiossa muodostuu lämpöä, joka kiihdyttää myöhempiä lujittavia reaktioita. Kun kalkkia käytetään sideaineena, rakenteesta tulee karkeampi ja sen vedenläpäisevyys saattaa kasvaa. Kalkkia käytettäessä alkulujittuminen on suhteellisen hidasta, mutta sen sijaan rakenteessa tapahtuu huomattavasti pitkäaikaisreaktioita. Kalkki on hitaasti stabiloituva sideaine, jonka pozzolaaniset reaktiot voivat jatkuva vielä pitkään stabilointityön jälkeen. Kalkin kyky diffundoitua ympäröivään saveen tasoittaa mekaanisen sekoittamisen epähomogeenisuuksia ja parantaa siten lopputuloksen laatua (Forsman, J. et. al.).

3.4.4 Palavan kiven tuhka

Palavan kiven tuhkaa muodostuu erityisesti Baltian maissa palavan kiven poltossa. Tuhka on erittäin reaktiivista, ja se sisältää paljon kalsiumia. Polttotekniikka vaikuttaa tuhkan koostumukseen. Palavan kiven tuhalla voidaan korvata sementin tarvetta joko kokonaan tai osittain, riippuen stabiloitavasta maalajista ja kohteen vaatimuksista (<http://www.osamat.ee/en/documents/aasta-2016-dokumendid/31-booklet-eng/file>).

3.4.5 Muut sideainekomponentit

Muita stabilointityössä hyödynnettäviä sideainekomponentteja ovat erilaiset kuonat, lentotuhkat sekä kipsimäiset materiaalit. Näitä materiaaleja käytetään yleensä kaupallisten sideaineiden rinnalla, jolloin niiden tarkoituksena on vaikuttaa positiivisesti saavutettaviin teknisiin ja/tai ympäristöllisiin ominaisuuksiin sekä pienentää sideainekustannuksia. Joissain poikkeustapauksissa stabilointi/kiinteyttäminen on mahdollista toteuttaa jopa pelkästään em. materiaaleja sideaineena käyttäen. (Forsman, J. et. al.)

Näitä ns. sivutuotesideaineita käytettäessä kokonaissideainemäärä useimmiten kasvaa, mutta toisaalta sideainekustannuksissa on monissa tilanteissa saavutettavissa merkittäviäkin hyötyjä. Kokonaissideainemäärän kasvattaminen voi jonkin verran hidastaa varsinaisen stabilointityön toteutusta. (Forsman, J. et. al.)

Taulukkoon 2 on koottu teollisuuden sivutuotekomponenttien ominaisuuksia.

Taulukko 2. Teollisuuden sivutuotekomponenttien sideaineominaisuuksia. Merkkien selitykset: +*pieni positiivinen vaikutus*, ++ *selvä positiivinen vaikutus*, - *ei vaikutusta*.

Ominaisuudet	Lentotuhkat	Kuonat	Kipsimäiset aineet	Palavan kiven tuhka
Alkulujittuminen	+/-	+/-	Hidas	+/-
Pitkäaikaislujittuminen	hidas → +	hidas → +/++	hidas→+ /++	+/-→ +/++
Vaikutus jäykkyyteen				+
Vaikutus liukoisuuteen	Tapauskohtainen			
Vaikutus vedenläpäisevyyteen	kasvaa	kasvaa	+/-	kasvaa
Tyypillinen käyttö-määrä*	kaikilla 50...150 kg/m ³			
Minkä kaupallisen sideaineen kanssa yleensä käytetään rinnakkain	sementti	sementti	sementti, kalkki	sementti
Kuiva vai kostea lisäkomponentti (vaikuttaa sekoitukseen kentällä)	kuiva (lento-tuhka) / kostea (kasa-tuhka)	kuiva	kostea (aina)	kuiva
Jauhatuksen vaikuttaminen ominaisuuksiin	+	+		+

*tarkoittaa pääasiassa sivutuotemäärää

Laboratorio-ohjetta varten pohdittavia asioita:

- Sideaineiden säilytystapa ja -aika laboratoriossa (maksimi käyttöikä)
- Sideaineiden lisääminen maanäytteeseen (yksittäin, vai sekoitettuna mikäli tutkitaan sideaineseosta?)

3.5 Sekoittaminen

Sekä itse näytteen homogenisoinnilla että näytteen ja sideaineen sekoittamisella pyritään mahdollisimman tasalaatuisen lopputulokseen, jossa näyte edustaa keskiarvoa ko. pisteestä stabiloituna. Sideaineen tulee sekoittua maanäytteeseen riittävän tasaisesti, jotta kemialliset reaktiot jakautuvat tasapuolisesti stabilointikohteessa. Laitteen pitää pystyä sekoittamaan sekä pieniä että suuria näytemääriä (huomioitava mm. sekoituskoukun etäisyydet reunoilta/pohjalta, kulhon muoto, sekoituskoukun muoto jne.)

Sekoittimen tulee olla tarpeeksi tehokas ja kestävä, jotta se pystyy sekoittamaan voimakkaasti vaativia näyte-eriä. Pienille näyte-erille riittää laadukas keittiökäyttöön tarkoitettu monitoimikone, jossa on teräskulho (kts. kuva 2). Mikäli sekoitetaan isompia näyte-eriä, tulee todennäköisesti kyseeseen lattiamallinen teollisuuskäyttöön tarkoitettu taikinasekoitin.

Laboratoriossa sekoitettavan näytteen ja sideaineen seoksen tulee edustaa kentällä saavutettavaa sekoitusastetta, joten laboratorionäytettä ei saa sekoittaa liian täydellisesti, sillä varsinaisessa kenttätöössä sekoittuminen jää joka tapauksessa laboratorio-tasoa epätäydellisemmäksi. Sekoitus on kuitenkin toteutettava siten, että massa on tasalaatuista, muuten tuloksissa esiintyy liiallista hajontaa.



Kuva 2. Esimerkki monitoimikoneesta, jota voidaan käyttää pienten näyte-erien ja sideaineiden sekoittamiseen. Sekoituksessa tulee käyttää taikinakoukua, ei vispilää. (Kuva: Kitchen Aid / The Deep Mixing Method.)

Näytettä tulee sekoittaa tarpeeksi, mutta ei liikaa. Kuten kappaleessa 2.3 kävi ilmi, esitetyt ohjeistukset eivät kerro tarkkaa sekoitusaikaa. Yleisesti käytettäneen 2-5 minuutin sekoitusaikoja. Vertailukelpoisuuden kannalta oleellista on se, että kaikki testit tehdään samaa työtapaa käyttäen.

Käytettiin sekoittamisessa mitä aikaa tahansa 2–5 minuutin välillä, tulee sekoitusaika aina kirjata ylös ja käyttää järjestelmällisesti samaa sekoitusaikaa kyseisessä laboratorio-ohjelmassa.

Laboratorio-ohjetta varten pohdittavia asioita:

- sekoittamiseen käytettävä aika ja sekoittimen kierrosnopeus kullakin maa-lajilla
- sekoittamiseen käytettävä laitteisto + muut välineet
- sideaineiden sekoittaminen maanäytteen päälle – kaikki kerralla sekoitet-tuna, vai yksitellen vai sekoitetaanko eri osakomponentit ensin keskenään

3.6 Tiivistys

Artikkelissa "Laboratory testing of stabilised Swedish soils prepared with different moulding techniques" (Åhnberg, H. ja Andersson, M.) (märkämenetelmä) tutkittiin eri tiivistystapojen vaikutusta lujuuskehitykseen. Tutkittavana oli kahta eri savea, joiden ominaisuudet on esitetty taulukossa 3. Savien oleelliset erot olivat vesipitoisuudessa, orgaanisen aineksen määrässä sekä savipitoisuudessa.

Taulukko 3. Tutkimuksessa käytettyjen savinäytteiden ominaisuudet (Åhnberg, H. ja Andersson, M.)

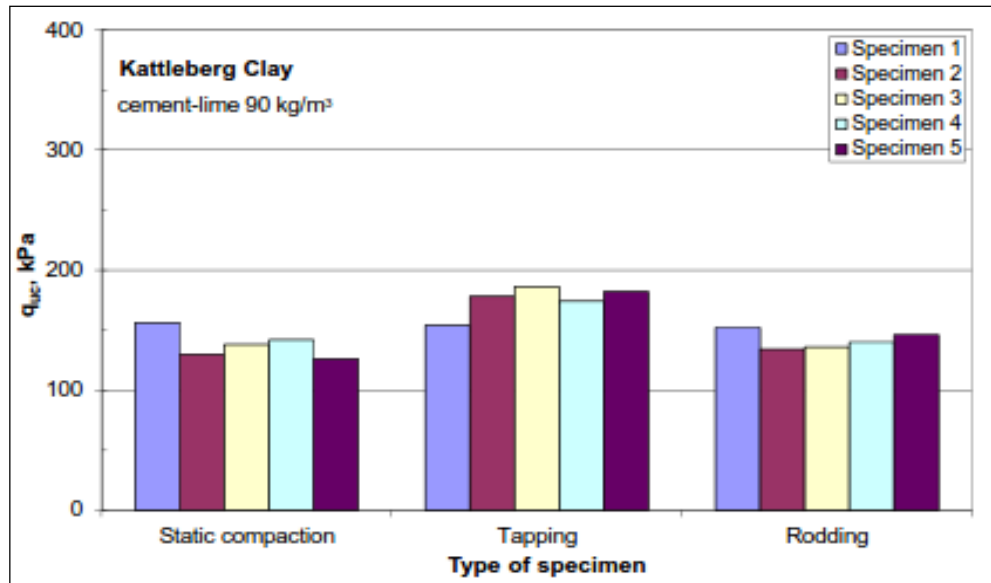
Ominaisuus	Kattleberg savi	Munkedal savi
Syvyys (m)	4,5	5
Irtotiheys (t/m ³)	1,45	1,83
Kiintotiheys (t/m ³)	2,74	2,72
Vesipitoisuus (%)	102	44
Plastisuusraja (%)	26	19
Juoksuraaja (%)	66	40
Suljettu leikkauslujuus (kPa)	10	25
Orgaaninen aines (%)	0,8	1,8
Savipitoisuus (%)	70	46
Mineralogia	Illittinen	Illittinen
pH	8,6	8,3

Tutkitut tiivistystavat olivat seuraavat (Åhnberg, H. ja Andersson, M.):

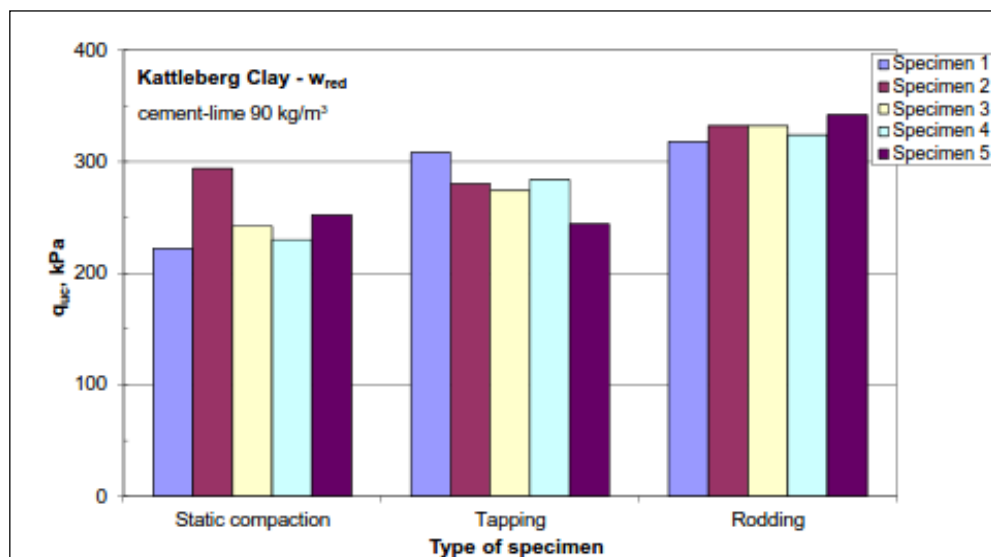
- Staattinen tiivistys (*static compaction*), jossa näytettä painetaan 5 sekunnin ajan 100 kPa staattisella voimalla 30 mm välein kun muottia täytetään. Tämä on yleinen tiivistystapa Ruotsissa.
- Taputus (*tapping*), jossa muottia taputellaan pöytää vasten 30 kertaa 30 mm kerrospaksuuksin muottia täytettäessä.
- Kepillä tiivistäminen (*rodding*), jossa näytettä sullotaan kepin avulla 20-30 mm kerrospaksuuksin.

Testiohjelmassa Kattlebergin savi stabiloitiin käyttäen 90 kg/m³ kalkki-sementtiä sekä näytteen omassa vesipitoisuudessa että kuivatetussa näytteessä (0,65). Munkedalin savi stabiloitiin käyttäen 80 kg/m³ kalkki-sementtiä. Jokaista näytettä valmistettiin 5 kpl edellä mainittuja kolmea eri tiivistystapaa käyttäen. Näytekappaleet varastoitettiin 7 °C lämpötilassa 28 vrk ajan ennen koestusta. Kuvissa 3–5 on esitetty 28 vrk puristuslujuudet näytteittäin (Åhnberg, H. ja Andersson, M.).

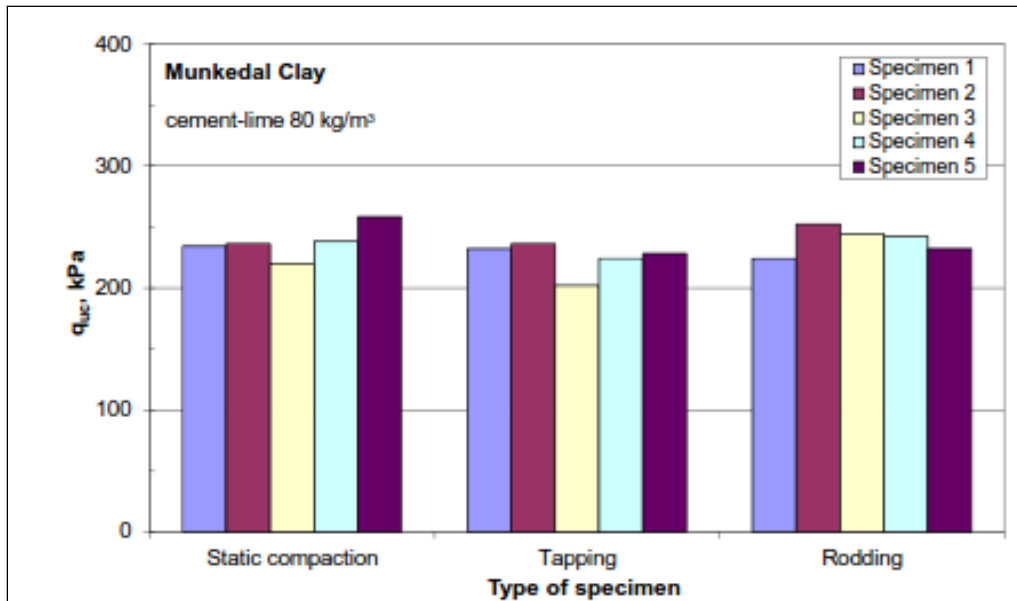
Kuten kuvista havaitaan, erot ovat verrattain pieniä. Suurimmat erot esiintyvät kuvan 4 mukaisesti Kattlebergin savella käytettäessä 90 kg/m³ kalkki-sementtiä jossa kepillä tiivistettynä puristuslujuudet ovat selvästi muita tiivistystapoja korkeampia. Keppiin joudutaan turvautumaan yleensä silloin, kun sekoitettu massa muuttuu murumaiseksi ja kuivaksi, eikä sitä saa tiivistettyä muottiin muilla menetelmillä.



Kuva 3. 90 kg/m³ kalkki-sementti Kattlebergin savella (Åhnberg, H. ja Andersson, M.).



Kuva 4. 90 kg/m³ kalkki-sementti Kattlebergin savella, jonka vesipitoisuus on pienennetty (Åhnberg, H. ja Andersson, M.).



Kuva 5. 80 kg/m³ kalkki-sementti Munkedalin savella (Åhnberg, H. ja Andersson, M.).

Muuten artikkelin tulosten perusteella ei voi vetää yleisiä johtopäätöksiä tiivistysmenetelmän paremmuudesta/huonoudesta, mutta on selvää että kepillä tiivistettäessä laboratoriohenkilön voimankäyttö tuo lisää subjektiivista eroa koekappaleen valmistukseen. Syvästabilointiohjetta varten tulisi pohtia onko mahdollista määrittää sellainen raja tiivistettävän materiaalin osalta, jolloin tulee systemaattisesti siirtyä käyttämään tiivistyskeppiä. Koekappaleiden tiiveyttä voidaan seurata punnitsemalla muotissa oleva massa tiivistyksen jälkeen ja verrata rinnakkaiskappaleisiin onko tiiveydet samoilla tasoilla. Oleellista kaikissa tapauksissa on, ettei tiivistetyissä koekappaleissa ole koloja.

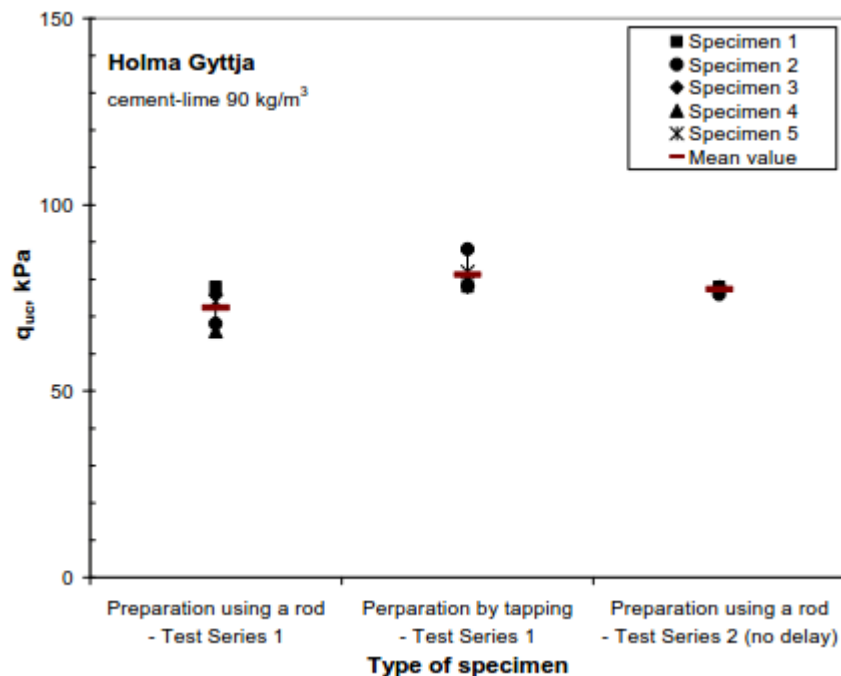
Toisessa artikkelissa, "Influence of laboratory procedures on properties of stabilised soil specimens" (Åhnberg, H. ja Holm, G.) tutkittiin tiivistystavan lisäksi myös sekoittamisen ja tiivistämisen välisen viiveen vaikutusta puristuslujuuteen. Tutkimuksessa mukana olleet materiaalit ja niiden ominaisuudet on esitetty taulukossa 4. Tutkimus tehtiin The Deep Mixing Method-ohjeistuksen pohjalta, joten kyseessä on märkämenetelmä jossa sideaine lietetään ensin veteen ennen sekoittamista maanäytteeseen.

Taulukko 4. Tutkimuksessa käytettyjen maanäytteiden ominaisuudet (Åhnberg, H. ja Holm, G.).

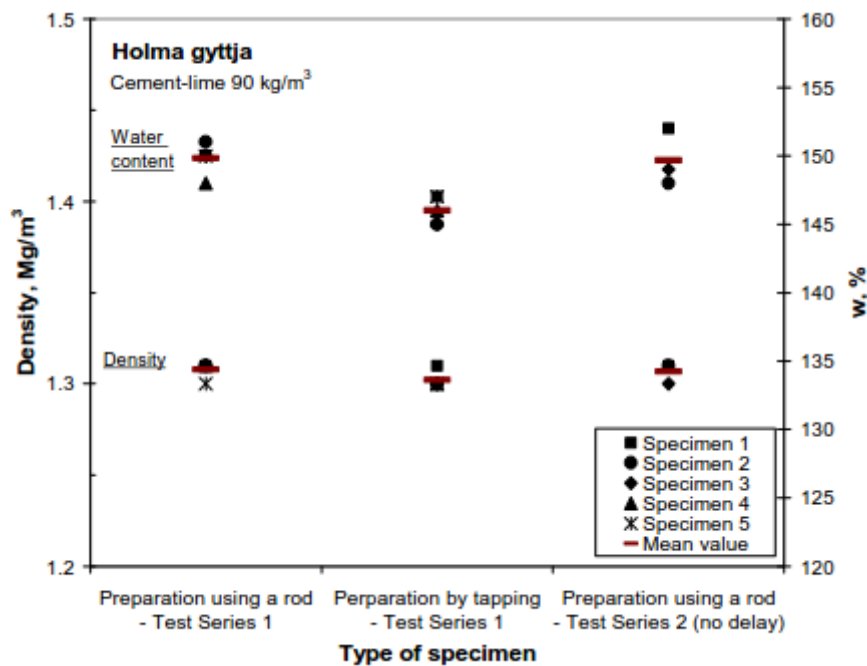
Ominaisuus	Holma gytija	Grimsås turve
Syvyys (m)	4-5	1-5
Irtotiheys (Mg/m ³)	1,25	0,97*
Kiintotiheys (Mg/m ³)	2,36	1,41
Vesipitoisuus (%)	196	1022
Plastisuusraja (%)	65	330
Juoksuraaja (%)	170	930
Suljettu leikkauslujuus (kPa)	10	25
Orgaaninen aines (%)	10	98
Savipitoisuus (%)	80	-
Mineralogia	Illittinen	-
pH	4,0	4,3

Näytteet stabiloitiin sementillä tai kalkki-sementillä suhteessa 50:50. Gytjtalle käytetty sideainemäärä oli 90 kg/m^3 ja turpeelle 150 kg/m^3 . Testisarjat ja niiden tutkimus-tarkoitukset olivat seuraavanlaiset (Åhnberg, H. ja Holm, G.):

- Testisarja 1: tiivistystavan vaikutus kalkki-sementtistabiloituun gyttjaan, tiivistäminen kepillä tai taputtelemalla (kuvat 6 ja 7)
- Testisarja 2: Sideaineen kostutuksen ja tiivistämisen valmistumisen välisen viiveen vaikutus sementtistabiloituun sekä kalkki-sementtistabiloituun gyttjaan, tutkittiin välitön tiivistys sekoittamisen jälkeen, 20 minuutin viive sekä 60 min viive (kuva 8)
- Testisarja 3: Varastointilämpötilan vaikutus sementtistabiloituun turpeeseen. Kappaleet varastoitiin veteen upotettuina 7°C :ssa, 20°C :ssa ja 40°C :ssa ja niihin kohdistettiin 18 kPa kuormitus. Ennen puristuslujuusmäärittystä 40°C :ssa olleet kappaleet annettiin olla huoneenlämmössä 30 min ajan. (Näistä tuloksista lisää kappaleessa 3.7)

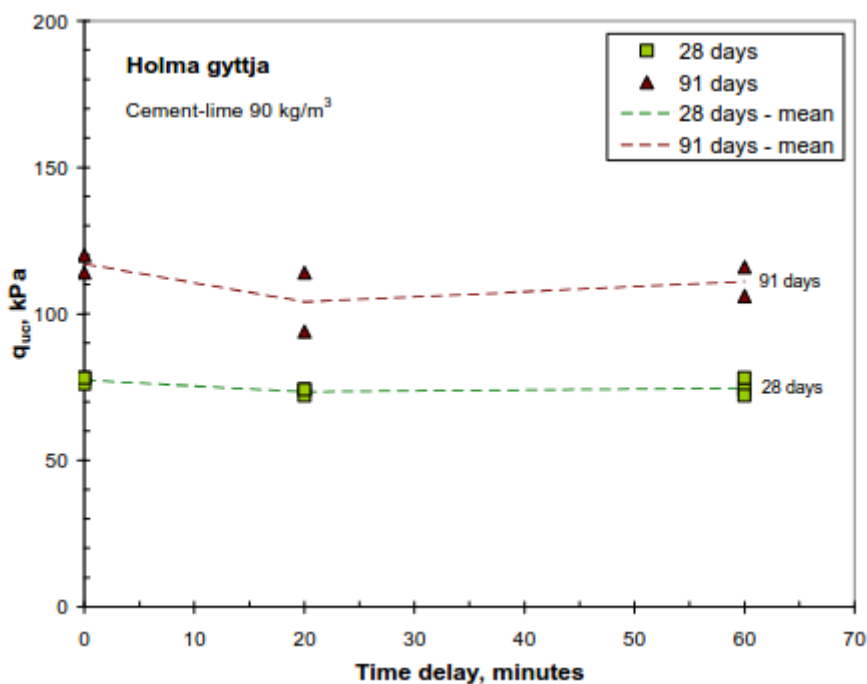


Kuva 6. Tiivistystavan vaikutus puristuslujuuteen (Åhnberg, H. ja Holm, G.).



Kuva 7. Tiivistystavan vaikutus tiheyteen ja vesipitoisuuteen. (Åhnberg, H. ja Holm, G.)

Kuvien 6 ja 7 perusteella ei löydy merkittäviä eroja tutkittuihin parametreihin. Pöytää vasten taputtelemalla tehdyllä testisarjalla on jonkin verran korkeammat puristuslujuustulokset, mutta tulosten suuruusluokka on kuitenkin sama kaikilla testisarjoilla. Vesipitoisuudessa oli jonkin verran eroa taputtelemalla tehdyllä koesarjalla verrattuna kahteen muuhun sarjaan. Tiheys oli kaikilla testisarjoilla hyvin samankaltainen. On huomattava, että nyt kyseessä oli pehmeä gyttja.



Kuva 8. Sekoittamisen ja tiivistämisen välisen viiveen vaikutus 28 ja 91 vrk puristuslujuuteen kalkki-sementtistabiloidulla gyttjalla (Åhnberg, H. ja Holm, G.).

Kuten kuva 8 kertoo, ei sekoittamisen ja tiivistämisen välisellä viivellä ole juurikaan merkitystä lopulliseen puristuslujuuteen.

Laboratorio-ohjetta varten pohdittavia asioita:

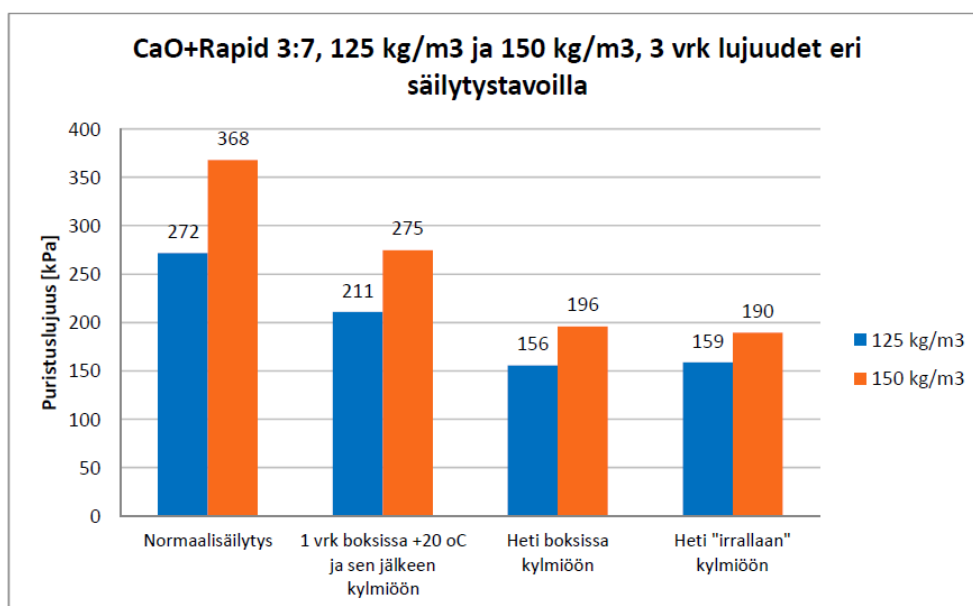
- muotin halkaisija ja pituus/maalaji
- tiivistystavan valinta näytteen käyttäytymisen/ohjeistuksen perusteella
- tiivistystapa on mahdollisuuksien mukaan pidettävä aina samana koko testisarjan läpi (vähintään samalla runkomateriaalilla)
- tiivistystavan kirjaaminen ylös
- sekoittamisen ja tiivistämisen välinen sallittu aikahaarukka
- välineet ja niiden yhtenäistäminen
- kirjattavat ja mitattavat asiat, tiheys, vesipitoisuus, jne.

3.7 Lämpötila, varastointi ja esikuormitus

Varastointilämpötilalla on huomattava vaikutus puristuslujuuteen. Rambollin Luopioisten geoteknisessä laboratoriossa selvitettiin esimerkinomaisesti yhdellä runkomateriaalilla varastoinnin vaikutusta puristuslujuuteen. Käytetty sideaineseos oli kalkin ja rapid-sementin seos suhteessa 3:7 ja käytetyt sideainemäärät olivat 125 kg/m^3 ja 150 kg/m^3 . Näytteistä tutkittiin 3 vrk lujuudet. Vertailut säilytystavat olivat seuraavat:

- Normaaლისäilytys: 2 vrk eristetyssä laatikossa huoneenlämmössä ja sen jälkeen kylmiöön laatikon kansi avattuna
- Kuten edellinen, mutta vain 1 vrk eristetyssä laatikossa huoneenlämmössä ja sen jälkeen kylmiöön laatikon kansi avattuna
- Lämpöeristetyssä laatikossa suoraan kylmiöön
- Irrallisina koekappaleina suoraan kylmiöön

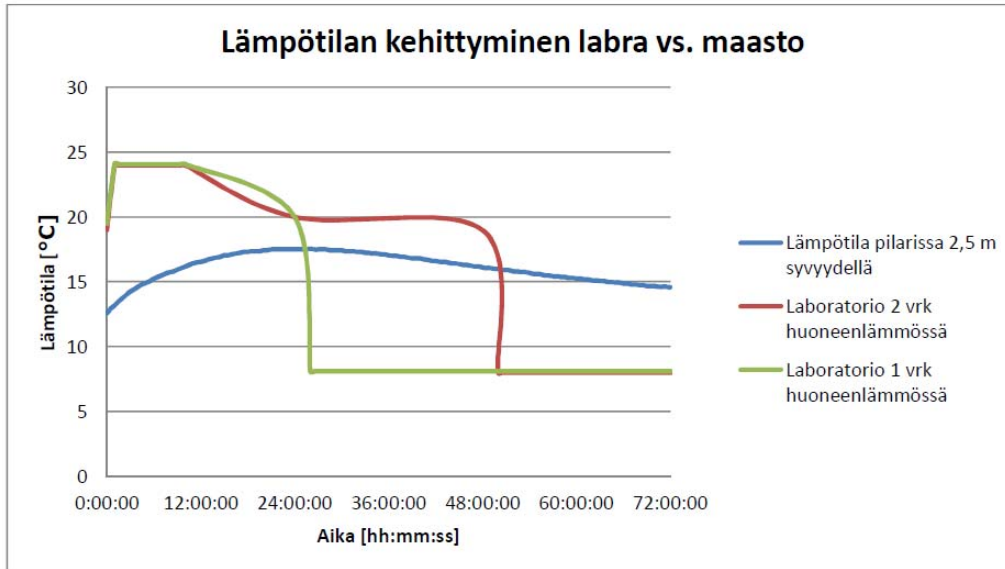
Kylmiön lämpötila oli (+ 8 °C). Kuvassa 9 on esitetty puristuslujuudet 3 vrk iässä.



Kuva 9. Lämpötilan vaikutus puristuslujuuteen (T&K-aineisto, Ramboll).

Kuten kuva 9 kertoo, lämpötilalla on erittäin merkittävä vaikutus puristuslujuuteen. Lämpötilan merkitys tuleeikin ottaa huomioon lopullisessa laboratorio-ohjeessa.

Lisäksi verrattiin lämpötilan kehittymistä laboratorionäytteissä vs. maastossa pilarissa 2,5 metrin syvyydellä. Kuvassa 10 on esitetty lämpötilan kehitys 72 tunnin aikana.



Kuva 10. Lämpötilan kehitys kahdella laboratorionäytteellä sekä maastossa pilarissa 2,5 m syvyydessä (T&K-aineisto, Ramboll. Huom. Maastomittaukset tehnyt VR Track).

Kuten kuva 10 kertoo, on tässä tutkittujen laboratorionäytteiden lämmönkehitys ensin huomattavasti korkeampaa kuin varsinaisessa pilarissa, mutta lämpötilat laskevat pilarin lämpötilaa alemmalle tasolle heti siirrettäessä ne kylmiöön – 1 vrk huoneenlämmössä ollut näyte reilun 24 h jälkeen ja 2 vrk huoneenlämmössä ollut näyte reilun 48 h jälkeen. Pilarin lämpötilan kehittyminen on huomattavasti tasaisempaa. Kuvasta näkee myös, miten suuri ero lämpötilassa on laboratoriokappaleiden kesken.

Helsingin kaupungin kiinteistöviraston julkaisussa vuodelta 1993 on tutkittu massatabiloidun materiaalin lämpötilan kehittymistä lujittumisvaiheessa. Koemassojen lämpötilakehitystä seurattiin lämpötila-anturein, jotka oli upotettu massaunnaan puolen metrin välein. Käytetyt sideaineseokset olivat seuraavat Tattarisuon koemassoille (% saven kuivapainosta) (Karlstedt, P. ja Halkola, H.):

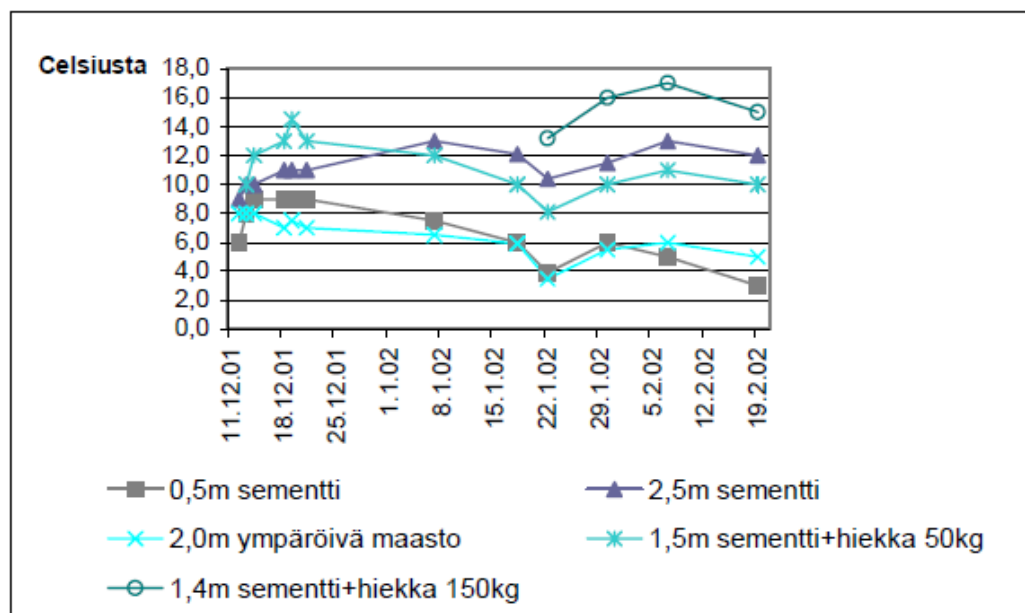
- rikinpoiston lopputuote 30 % + sementti 7 %
- rikinpoiston lopputuote 15 % + kalkki 4 %
- rikinpoiston lopputuote 15 % + kalkki 7 %
- rikinpoiston lopputuote 30 % + kalkki 7 % + masuunikuonajauhe 3 %
- rikinpoiston lopputuote 30 %

ja Herttoniemen koemassoille:

- rikinpoiston lopputuote 33 % + kalkki 7,7 %
- rikinpoiston lopputuote 30 % + sementti 6,6 %
- kalkki 4,5 % + masuunikuonajauhe 3 %

Lämpötilakäyristä havaittiin, että kalkin sammuminen ja ioninvaihtoreaktiot loppuivat 10. vuorokauden tienoilla ja massan lämpötila alkoi laskea. Kuitenkin vielä 60–100 vuorokauden kuluttua sekoittamisesta lämpöä vapauttavia lujittumisreaktioita oli havaittavissa. Reaktiot olivat kiivaimmillaan stabiloidun kerroksen alaosassa sen tiivistyneisyyden vuoksi. (Karlstedt, P. ja Halkola, H.) Liitteessä 3 on esitetty tutkittujen kohteiden lämpötilan kehitys pitkällä aikavälillä.

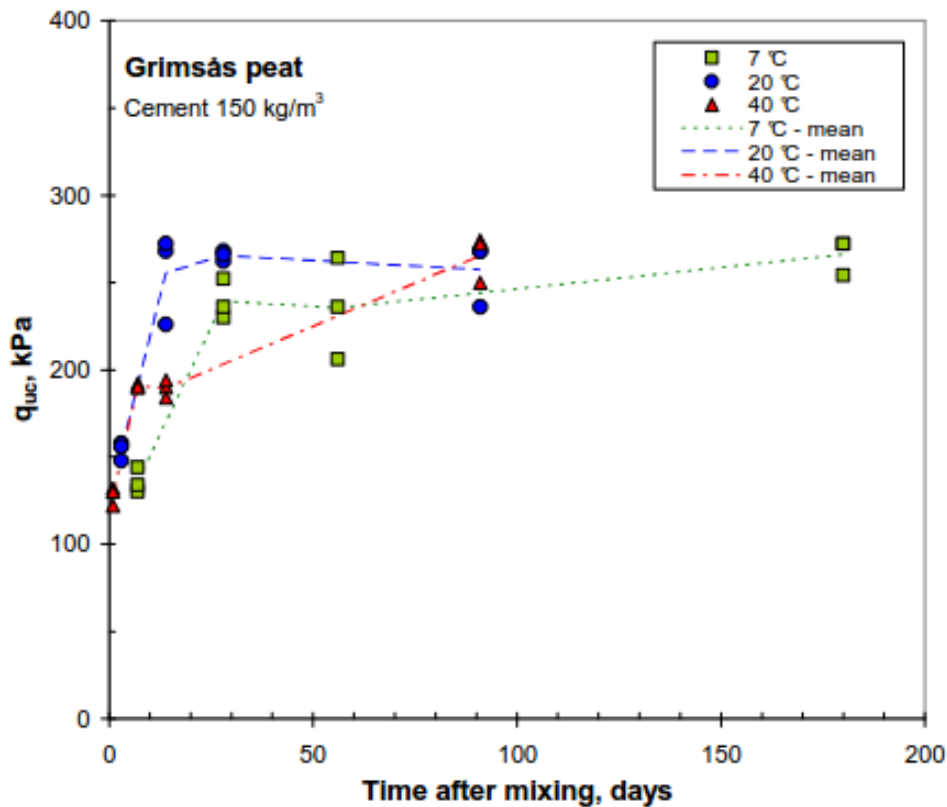
Kuvassa 11 on esitetty Tampereen Lielahden koerakentamiskohteessa lämpötilojen kehitystä eri syvyyksiltä stabiloidussa turvekerroksessa. Lämpötiloja mitattiin sementillä stabiloidulla alueella kolmelta eri syvyydeltä; heti suodatinkankaan alapuolelta (ei kuvassa) sekä 0,5 m ja 2,5 m suodatinkankaan alapuolelta.



Kuva 11. Lämpötilojen kehitystä stabiloidussa turvekerroksessa Tampereen Lielahden koerakentamiskohteessa. (Hautalahti, P., Länsivaara, P. ja Forsman, J.)

Edellä esitetyt esimerkit (myös liite 3) osoittavat että lämpötila on alussa selvästi suurempi ja tasaantuu vähitellen. Koska lämpötilalla on suuri merkitys lopputuloksen kannalta, tulee laboratorio-ohjeessa kiinnittää huomiota varastointilämpötilan lisäksi myös ensimmäisten vuorokausien säilytykseen ja säilytystapaan.

Kuvassa 12 on esitetty Åhnberg, H. ja Holm, G. tutkimuksen ”Influence of laboratory procedures on properties of stabilised soil specimens” kolmannen testisarjan tulokset. Testisarjassa tutkittiin varastointilämpötilan vaikutusta sementtistabiloituun turpeeseen. Kappaleet varastoitettiin veteen upotettuina 7 °C:ssa, 20 °C:ssa ja 40 °C:ssa ja niihin kohdistettiin 18 kPa kuormitus. Ennen puristuslujuusmäärittystä 40 °C:ssa olleet kappaleet annettiin olla huoneenlämmössä 30 min ajan (Åhnberg, H. ja Holm, G.) (kts. kappale 3.6).

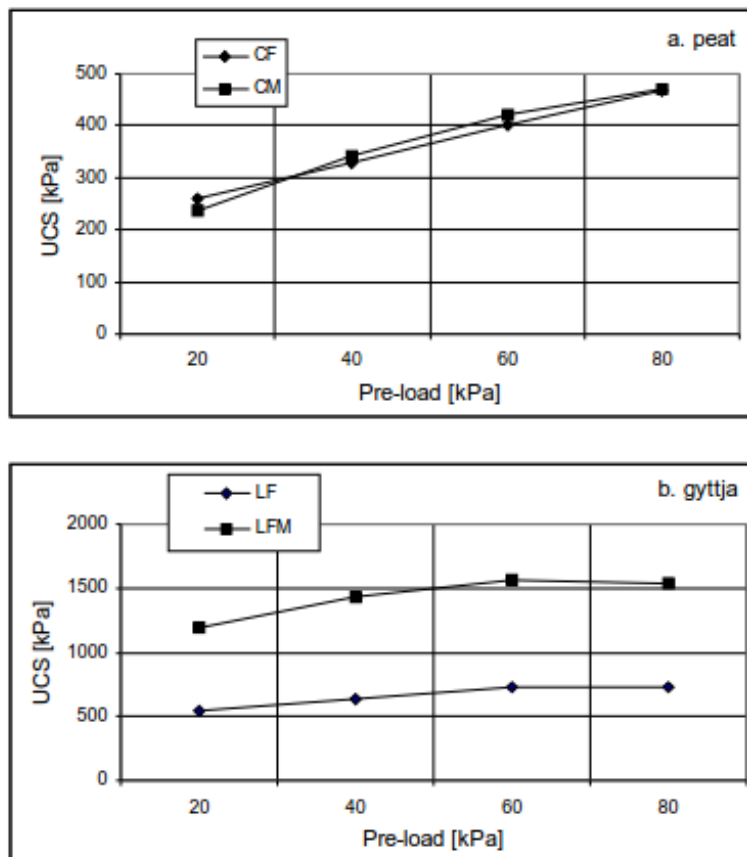


Kuva 12. Varastointilämpötilan vaikutus sementtistabiloidun turpeen puristuslujuuteen. (Åhnberg, H. ja Holm, G.)

Kuvasta 12 nähdään että 20 °C:ssa säilytetyillä koekappaleilla lujuuskehitys oli jonkin verran nopeampaa kuin 7 °C:ssa säilytetyillä. Tässä nimenomaisessa tapauksessa sideaineen määrä ei ollut riittävä lisäämään pitkäaikaislujuutta 28 vrk jälkeen. Varastointi 40 °C:ssa ei tuonut lisälujuutta verrattuna 20 °C:ssa säilytettyihin kappaleisiin tällä koesarjalla (Åhnberg, H. ja Holm, G.).

Myös esikuormituksella on vaikutus puristuslujuuteen. Tavallisesti esikuormituksena käytetään laboratorioissa 18 kPa pystykuormitusta, jota käyttäen päästään kohtuullisen lähelle todellista tilannetta massastabilointityön aikana, huomioiden myös näytesylinterien seinämäkitkan vaikutus. Esikuormitus on vaadittava aina kun kyseessä on voimakkaasti kokoonpuristuvat materiaalit, kuten esimerkiksi turpeet. Esikuormitus ei kuitenkaan ole välttämätön esimerkiksi savien kohdalla – savilla/silteillä kokoonpuristumun ja kuormituksen vaikutus jää tyypillisesti selvästi pienemmäksi kuin turpeilla. On kuitenkin huomioitava, että esikuormitettavien kappaleiden säilytyslämpötila lujittumisen aikana poikkeaa ”normaalista” savien kanssa käytetystä, ja tämä on huomioitava tuloksia tulkittaessa ja vertailtaessa. Joissain tapauksissa kannattaa harkinnan mukaan tämän takia tehdä myös savien/silttien testaus samaa esikuormitusta käyttäen.

Kuvassa 13 on esitetty esikuormituksen vaikutusta stabiloiduille Kivikon turpeelle ja Porvoon gyttjälle (EuroSoilStab).



Kuva 13. Esikuormituksen vaikutus puristuslujuuteen (EuroSoilStab).

Norjalaisessa stabilointiohjeessa ohjeistetaan laittamaan koekappaleet muovipussiin, jossa on lisäksi kostea paperipyyhe. Koekappale nostetaan muovipussissa kosteushuoneeseen, jonka kosteus on 100 % (Veiledning for grunnforsterkning med kalksementpeler. Høring september 2011. Norsk Geoteknisk Forening).

Laboratorio-ohjetta varten pohdittavia asioita:

- ensimmäisten vuorokausien varastointilämpötila
- ensimmäisten vuorokausien varastointitapa (lämpölaatikko vai ei, kannella vai ilman kantta) → ehdottomasti kannen kanssa!
- ensimmäisten vuorokausien lämpökäsittely, 1, 2 vai 3 vrk?
- varastointilämpötila ja -tapa ensimmäisten vuorokausien jälkeen (kansi päällä vai ei)
- miten eri sideainelaadut ja -määrät pitäisi erotella lämpölaatikoihin – samalla tavalla käyttäytyvät samaan laatikkoon, millainen rajanveto?
- jätetäänkö laatikoihin ilmatilaa vai täytetäänkö laatikon tyhjätila esim. kuplamuovilla?
- miten laatikot täytetään eli kuinka paljon koekappaleita per laatikko – rajat minimi- tai maksimimäärälle?
- laatikon koko ja seinämäpaksuus (eristyskyky)

3.8 Puristuslujuuden määrittäminen

Koekappaleiden puristuslujuudet määritetään yksiakselisella puristuslujuuskokeella, jossa sylinterin muotoista koekappaletta kuormitetaan tasaisella nopeudella, kunnes koekappale murtuu. Kuormitusnopeus on yleensä 1 mm/min tai turvenäytteille 2 mm/min. Myös muita kuormitusnopeuksia käytetään.

Puristuslujuustulokseen vaikuttavat kaikki kappaleessa 3 esitetyt asiat, jotka muokkaavat maanäytteen ominaisuuksia. Lujuustulokseen vaikuttavat myös koekappaleen päiden tasaisuus sekä koekappaleen korkeuden suhde halkaisijaan (muotokerroin). Koekappaleen päät tasataan siten, että maksimi sallittu poikkeama kaltevuudesta on 0,5 % (kuten standardin ISO/DIS 17892-7:2016 luonnoksessa) ja epätasaisuus 0,5 mm. Mikäli koekappaleen päät ovat epätasaiset, puristava voima kohdistuu epätasaisesti eikä lopputulos ole luotettava.

Raportoinnissa on huomattava, että laboratoriokokeissa lopputuloksena ilmoitettava puristuslujuus on eri asia kuin mitoituksessa käytettävä leikkauslujuus.

Laboratorio-ohjetta varten pohdittavia asioita:

- kuormitusnopeus/maalaji
- muotokerroin, sallitut rajat koekappaleiden mitoille
- merkitsevien numeroiden määrä tulosten käsittelyssä
- jännitys-muodonmuutoskäyrien tulostaminen vai numeerinen tieto tulosten käsittelyssä

4 Ehdotuksia toimintatavoiksi

Taulukkoon 5 on koottu ehdotuksia yhteisiksi sovittaviksi toimintatavoiksi syvästabiloinnin laboratorio-ohjeeseen aiemman tekstin perusteella.

Taulukko 5. Ehdotuksia syvästabiloinnin laboratorio-ohjeessa huomioitavista toimintatavoista.

		Kommentti/perustelut
Näytteen määrä	Savet 1 litra / 3 koekpl Turpeet 1 litra/1 koekpl	
Runkoaineiden säilytys	Viileässä	Huoneenlämmössä runkoaine ikääntyy nopeammin. Ei aiheuta ongelmaa lyhyen ajan säilytyksessä, mutta mikäli näyte täytyy varastoida pidemmäksi aikaa, se säilyy tuoreempuna kylmäsäilytyksessä.
Runkoaineiden homogenisointi	Koko näyte (myös eri astioissa olevat) tulee homogenisoida.	Homogenisointi on yksi merkittävimmistä tulokseen vaikuttavista tekijöistä. Mikäli runkoainenäytettä ei homogenisoida kunnolla, tulosten luotettavuus ja toistettavuus kärsii suuresti.
Näytteen lämpötila kun sekoitustyö alkaa	Huoneenlämpötila	Runkomateriaalit nostetaan kylmästä huoneenlämpöön 24 h ennen stabiloitu- vuuskokeiden aloittamista. Tämä on vakioidu toimintatapa, jolloin lämpökäsittelyn vaikutus on hallitumpi. Työn aikana näyte on käytännössä joka tapauksessa ainakin jonkin aikaa laboratoriotilassa, jolloin lämpötila muuttuu työn kuluessa jos ei ole ehtinyt tasaantua.
Sideaineiden säilytys	Tiiviit astiat, maksimi-ikä 6 kk	Sideaineet eivät saa joutua kosteuden kanssa tekemisiin jotta niiden ominaisuudet eivät muutu. Kenttätyössä sideaineet syötetään kuivana (pl. kasatuhkat ja kipsit). Varastointiaika muuttaa sideaineiden reaktiivisuutta, joten joku rajanveto sideaineen iästä tulee tehdä.
Sekoitus aika (maksimi)	2 min (max. 5 min.)	EuroSoilStab, Djupstabilisering ja The Deep Mixing Method ohjeistavat sekoittamaan 2–5 minuuttia tai kunnes seos on visuaalisesti homogeenista. 2 minuutin sekoitusajalla massa on hyvin sekoittunut, mutta ei vielä liian täydellisesti. <u>Laboratoriossa tapahtuvan sekoituksen tulisi simuloida kentällä vastaavaa sekoittamista, ja usein jo 2 min sekoituksella massa on homogeenisempaa kuin kentällä.</u>

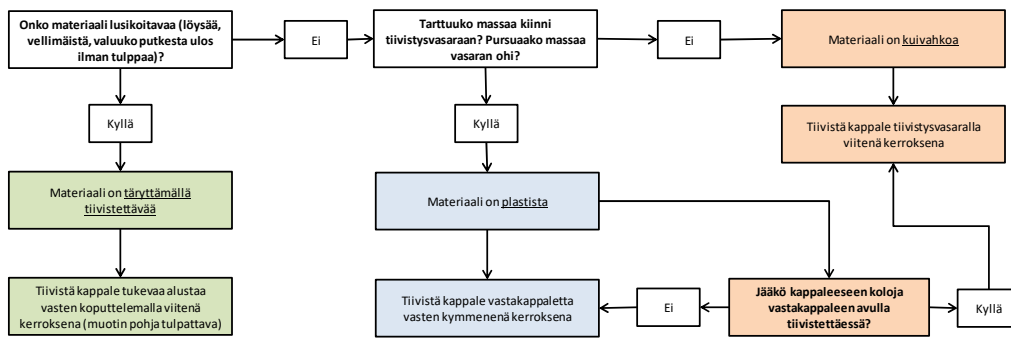
		Kommentti/perustelut
Koekappaleiden määrä	Vähintään 2 rinnakkaiskappaletta	Optimi olisi 3 rinnakkaiskappaletta, mutta tästä tulee kustannuskysymys. Minimimäärä on ehdottomasti 2 kpl, jotta saadaan vertailua.
Muotinkoko	Savet, siltit halkaisija 42-50 mm, turpeet 68 mm	
pH:n mittaus seoksesta	Tarvittaessa	pH:n voi mitata tarvittaessa vasta puristetusta kappaleesta, kokemuksen perusteella ei näyttöä merkittävistä pH-arvojen muutoksesta. pH mitataan seuraavasti: *kenttäolosuhteissa kalibroidulla kenttämittarilla *laboratoriossa noudattaen standardia "SFS-EN 15933 Sludge, treated biowaste and soil" mukaisesti.
Tiivistystapa	Riippuen materiaalista: *Täryttämällä tiivistettävät materiaalit *Plastiset materiaalit *Kuivat materiaalit	Ks. kohta a) tämän taulukon jälkeen.
Tiheyden mittaus	Kyllä (koekappalekohtaisesti)	Kertoo tiivistyksen onnistumisesta.
Putkien sulkeminen	Laboratorion käytäntöjä noudattaen	Pääasia ettei näyte pääse kuivumaan.
Koekappaleiden säilytys ja varastointilämpötila	1 tai 2 ensimmäistä vrk huoneenlämmössä lämpöeristetyissä laatikoissa, tämän jälkeen kylmiöön 7–8 °C tarvittavaksi lujittumisajaksi	<ul style="list-style-type: none"> 1-2 ensimmäistä vrk kannellisissa lämpöeristetyissä laatikoissa sideaineittain eriteltynä, jotta alkulujittumisessa muodostuva lämpö ei pääse karkaamaan (kappale 3.7) Tämän jälkeen kylmiössä ilman kantta
Lujuuden korjaus muotosuhteen muuttuessa	Maininta poikkeavasta koekappalekoosta mikäli h/d \neq 1.8-2.5	
Puristettavan kappaleen koko	Savet, siltit halkaisija 42–50 mm, turpeet 68 mm, korkeus 2 x halkaisija (standardissa sallittu muoto-suhde 1.8–2.5)	CEN/ISO TS 17892-7:fi, kohta 5.1.2: Sylinterin muotoisille koenäytteille tulee korkeuden ja halkaisijan suhde olla välillä 1,8-2,5. (HUOM. standardin päivitys vuonna 2017)
Puristusnopeus	1-2 mm/min Ks. kohta b) tämän taulukon jälkeen.	CEN/ISO TS 17892-7:fi, kohta 5.4.3: Nopeus tulee valita sellaiseksi, että koenäytteen murtuminen tapahtuu 2–15 minuutissa (HUOM. standardin päivitys vuonna 2017)

		Kommentti/perustelut
Puristuksen kesto	Mikäli murtumista ei tapahdu, puristetaan 10 % asti (kts. taulukko 6)	CEN/ISO TS 17892-7:fi, kohta 5.4.4: Puristus voidaan lopettaa, kun pysty-muodonmuutos saavuttaa 15 % tai alkaa vähentyä, kumpi vain tapahtuu aikaisemmin. (HUOM. standardin päivitys vuonna 2017)
Vesipitoisuuden määrittäminen	Tarvittaessa	CEN/ISO TS 17892-7:fi, kohta 7 c): Alkuperäinen vesipitoisuus kolmen merkitsevän numeron tarkkuudella, jos se on määritetty. (HUOM. standardin päivitys vuonna 2017)
Moduulien laskenta	Tarvittaessa	CEN/ISO TS 17892-7:fi, kohta 7 g): Yksiaksiaalinen puristuslujuus q_u ja suljettu leikkauslujuus c_u kahden merkitsevän numeron tarkkuudella, kPa (HUOM. standardin päivitys vuonna 2017)
Jännitys-muodonmuutoskuvaajien toimitus	Kyllä	
Tulosten merkintä	Kokonaisina kilo pascalleina (kPa)	
Voima-siirtymä-datan tallennus	Kyllä	
Mitä tietoja koekappaleesta ilmoitetaan	Kts. kohta c) taulukon jälkeen	

a) Tiivistystapa:

- 1) Täryttämällä tiivistettävät materiaalit
-löysiä, muotti vaatii pohjan, jotta materiaali ei valu ulos, tiivistys esimerkiksi pöytää vasten koputtelemalla
- 2) Plastiset materiaalit
-valettavien ja kuivien materiaalien välimuoto
-jää helposti ilmaa väliin
-tiivistys kiinteän vastakappaleen avulla
- 3) Kuivahkot materiaalit
-ei pysty tiivistämään valamalla eikä vastakappaleen avulla, vaatii vasaran
-yleensä murumaisia
-jää helposti koloja ja rakoja

Materiaalien välinen ero varmistetaan kuvan 14 kaavion mukaisesti. Materiaalin käyttäytyminen määrää tiivistystavan. Kuva 14 on esitetty myös liitteessä 4.



Kuva 14. Kaavio tiivistystavan valinnalle. Kuva on esitetty myös liitteessä 4.

b) Puristusnopeudella on huomattava vaikutus laboratorion kapasiteettiin. Esimerkki puristusnopeuden vaikutuksesta tuotantoon on esitetty taulukossa 6. Taulukon luvut on laskettu käyttäen 15 % arvoa johon asti puristetaan, ellei murtumista tapahdu aiemmin. Näin ei tietenkään ole kaikkien näytteiden kohdalla, mutta mikäli suuri näytesarja on pehmeää, sen koestaminen alle 1 mm/min nopeudella hidastaa työtä aivan oleellisesti. Oman viiveen työhön tuo myös koekappaleiden käsittely puristuskuntoon, eli todellisuudessa päivässä koestettavien koekappaleiden määrä jää taulukossa esitettyjä lukuja alhaisemmaksi.

Taulukko 6. Esimerkki puristuslujuusnopeudenvaikutuksesta tuotantoon, kun puristetaan 15 % sekä 10 % asti.

Kappaleen h (mm)	15 % x h (mm)	Puristusnopeus (mm/min)	Puristusaika (min)	Laskennallinen koekpl määrä/h	Laskennallinen koekpl määrä/ 8 h
100	15	0,2	75	0,8	6,4
		0,5	30	2	16
		1,0	15	4	32
136	20,4	0,2	102	0,6	5
		0,5	41	1,5	12
		1,0	20	2,9	24
		2,0	10	5,9	47

Kappaleen h (mm)	10 % x h (mm)	Puristusnopeus (mm/min)	Puristusaika (min)	Laskennallinen koekpl määrä/h	Laskennallinen koekpl määrä/ 8 h
100	10	0,2	50	1,2	9,6
		0,5	20	3	24
		1,0	10	6	48
136	13,6	0,2	68	0,88	7
		0,5	27	2,2	17,6
		1,0	14	4,3	34
		2,0	7	8,6	68,8

c) CEN ISO/TS 17892:fi Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratorio-kokeet.

Osa 7: Hienorakeisen maan yksiaksiaalinen puristuskoe.

Kappale 7. Koeselostus (HUOM. Seuraava listaus on standardista CEN/ISO TS 17892-7:fi, joka päivitetään vuonna 2017. Tämän raportin perusteella laadittavaan laboratorio-ohjeeseen on valittu tästä luettelosta vain oleelliset listattavat asiat.)

Koeselostuksen tulee vahvistaa, että koe oli tehty tämän asiakirjan mukaisesti ja sen tulee

- a) koetetun näytteen (aineksen) tunnistetiedot kuten kairausnumero, näytteen numero, näytteen syvyys, kokeen numero jne.
- b) koetetun aineksen kuvaus mukaan lukien tieto, onko koe suoritettu häiriintymättömästä vai täysin häiritystä maasta
- c) alkuperäinen vesipitoisuus kolmen merkitsevän numeron tarkkuudella, jos se on määritetty
- d) alkuperäinen irtotiheys kolmen merkitsevän numeron tarkkuudella, jos se on määritetty
- e) näytteen ulkomitat
- f) murtoon kulunut aika, minuuteissa
- g) yksiakselinen puristuslujuus q_u ja suljettu leikkauslujuus c_u kahden merkitsevän numeron tarkkuudella, kPa
- h) muodonmuutos murtotilassa kahden merkitsevän numeron tarkkuudella, %
- i) käytettyjen laitteiden tyyppi mukaan lukien kuormitusta mittaavan laitteen suurin puristuminen sekä männän ja ylälevyn välillä käytetty yhteys
- j) kuvaus poikkeamista verrattuna tässä asiakirjassa kuvattuihin menetelmiin
- k) muu tieto, joka tarvitaan koetulosten asiamukaiseen tulkintaan

Jos tarvitaan, tulee tehdä graafinen esitys pystysuuntaisen jännityksen σ_1 suhteesta muodonmuutokseen ϵ

Kimmomoduuli E_{50} määritetään puristuskokeesta saatavasta jännitys-muodonmuutoskuvaajasta kaavalla:

$$E_{50} = \frac{q_u/2}{\epsilon_{50\%}}$$

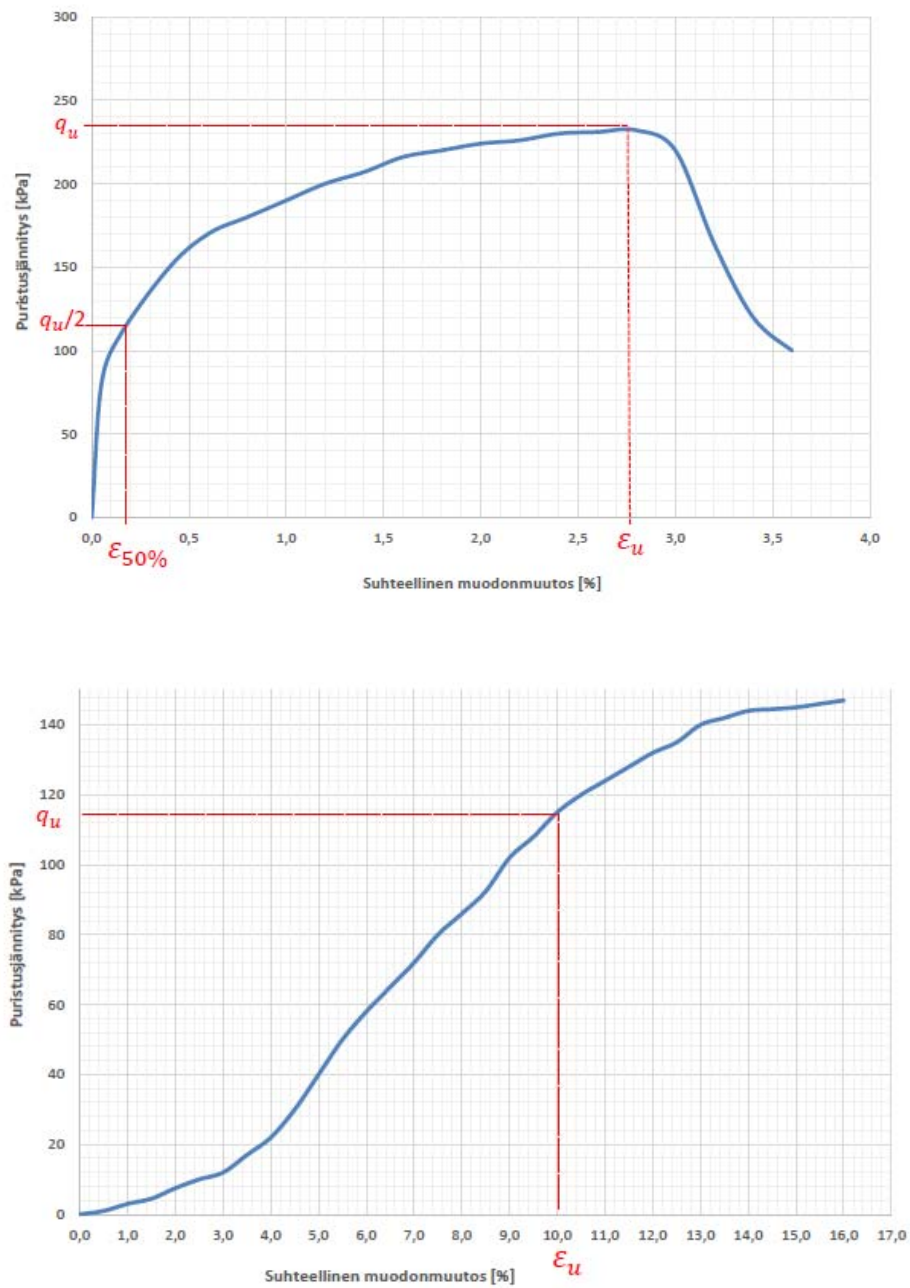
jossa

E_{50} kimmomoduuli [kPa]

q_u puristuslujuus [kPa]

$\epsilon_{50\%}$ puristuslujuuden puolikasta vastaava muodonmuutos [%]

Kuvassa 15 on esitetty erilaisia puristuslujuuskuvaajia.



Kuva 15. Esimerkkejä erilaisista puristuslujuuskuvaajista. Ylemmässä kuvassa murto tapahtuu noin 2,7 % kohdalla ja alemmassa kuvassa murtoa ei tapahdu, koska koekappale käyttäytyy myötölujittuvasti puristuskokeessa. Tällöin puristuslujuudeksi tulkitaan 10 % myötöä vastaava jännitys. (Ramboll Finland Oy)

5 Johtopäätökset

Kuten kirjallisuuslähteistä sekä haastatteluista käy ilmi, toimintatavat ja -ohjeistukset eivät ole yhtenäisiä. Työtavoissa voi olla suuria eroja, jolloin tulosten vertailukelpoisuus on mahdotonta ja johtaa erilaisiin lopputuloksiin.

Syvästabiloinnin laboratorio-ohjetta ei ole aiemmin tehty, mutta nyt tämän raportin perusteella tehtävään ohjeistukseen tehdään linjaukset yhteisistä käytännöistä, jotta tutkimusmenetelmät edustaisivat vielä nykyistä paremmin todellisia kenttäolosuhteita.

Yhteinen laboratorio-ohje edesauttaa tutkimustulosten vertailua myös laboratorioden välillä ja lisää syvästabilointimenetelmän luotettavuutta.

Tutkimusten lopputuloksen ja geoteknisen mitoituksen kannalta on olennaista, että kaikki toimijat käyttävät samoja, yhteisesti sovittuja periaatteita testeissään ja mahdolliset poikkeamat ohjeistuksesta perustellaan ja kirjataan tarkkaan ylös.

Lähteet

Eggen, A., Jensen, T.G. ja Karlsrund, K. 2011. Veiledning for grunnforsterkning med kalksementpeler. Luonnosversio (?) syyskuu 2011. Norsk Geoteknisk Forening.

EuroSoilStab. 2002. Development of design and construction methods to stabilised soft organic soils. Design Guide Soft Soil Stabilisation. CT97-0351. Project No.:BE 96-3177.

Forsman, J. et. al. 2014. Massastabilointikäsikirja. URL:
<http://projektit.ramboll.fi/massastabilointi//handbook.html> [luettu 30.10.2016].

Hainari, S. 2015. Massastabiloinnin vaikutus maan indeksi- ja geoteknisiin ominaisuuksiin. Diplomityö. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto.

Hautalahti, P., Länsivaara, T. ja Forsman, J. 2002. Massa- ja pilaristabiloinnin kehittämisraportti. Loppuraportti. Projektinnumero 82100004 (G0525).

Karlstedt, P. ja Halkola, H. 1993. Tiedote 61/1993. Ylijäämäsavien massastabilointi. Helsingin kaupunki. Kiinteistövirasto. Geotekninen osasto.

Larsson, R. 2006. Djupstabiliserin med bindemedelsstabiliserade pelare och massstabilisering. Rapport 17. Svensk Djupstabilisering.

OSAMAT. Management of environmentally sound recycling of oil shale ashes into road construction products. Demonstration in Estonia. Booklet.
URL: <http://www.osamat.ee/en/documents/aasta-2012-dokumendid/69-osamat-booklet-eng>.
Luettu 16.11.2016

Standardi SFS-EN 14679. Vahvistettu 30.05.2005. Pohjarakennustyöt. Syvästabilointi. Execution of special geotechnical works. Deep mixing. Suomen standardisoimisliitto SFS.

Åhnberg, H & Holm, G. 2009 (?). Influence of laboratory procedures on properties of stabilised soil specimens.

Åhnberg, H. ja Andersson, M. Laboratory testing of stabilised Swedish soils prepared with different moulding techniques (märkämenetelmä)

Henkilöhaastattelujen tarkoituksena oli selvittää eri laboratorioiden käytäntöjä. Kysymykset lähetettiin Staralle sekä Mitta Oy:lle, ja lisäksi tehtiin henkilöhaastattelut (Jukka Naukkarinen/Stara ja Minna Löytynoja/Mitta Oy). Laboratorioille lähetetyt kysymykset on esitetty liitteessä 2.

Laboratorioille lähetetyt kysymykset

Syvästabilointiohje – kysymyksiä tutkimuksia tekeville tahoille

Ohjelmointi

*tehdäänkö yleensä yhdellä/kahdella/kolmella rinnakkaisella koekappaleella?

*tutkitaanko yleensä eri lämpötiloissa / lujittumisaikoina?

Runkomateriaalit

*mitä runkoaineita (Sa, Tv, sedimentti...)?

*missä lämpötilassa säilytetään?

*homogenisoidaanko? miten?

Sideaineet

*mitä sideaineita?

*kuinka usein hankitaan uudet näytteet?

Sekoitus

*runkoaineen lämpötila seosta valmistettaessa?

*sekoitin ja välineet, ”sekoitusteho”, sekoitusaika, kerralla tehtävän seoksen määrä, kuinka

*monta koekappaletta kerralla?

Koekappaleen valmistus ja tiivistys

*putken materiaali, mitat? miten ja millä välineillä tiivistetään?

*mitataanko tiheys?

*mitä tavoitellaan?

*onko erityyppisille seoksille eri käytäntöjä/välineitä? millaisia?

Näytteiden säilytys

*putkien sulkeminen? säilytysasento (vaaka/pysty)?

*vakiohuone / vesihaude / jääkaappi (lämpötila)?

*lämpökäsittely (ennen jääkaappilämpötilaa)?

*millainen lämpökäsittely (aika, missä, mitä samassa laatikossa, kuinka suuret erät)?

Puristuslujuuden määrittäminen

*mitat?

*puristusnopeus, mitä käytetään? mikä vaikuttaa, jos ei ole aina sama?

*tallennetaanko voima-siirtymä -data, vai otetaanko vain maksimilukemat?

*päiden taseus, miten?

*mitataanko tiheys? entä vesipitoisuus?

Tulosten käsittely

*korjataanko lujuuksia, jos muotosuhde (korkeus/halkaisija) muuttuu?

*lasketaanko moduuleja? ilmoitetaanko puristuslujuuden lisäksi murtomuodonmuutos?

*mitä ilmoitetaan koekappaleesta (mitat, tiheys, puristusnopeus, säilytystapa, ikä...)?

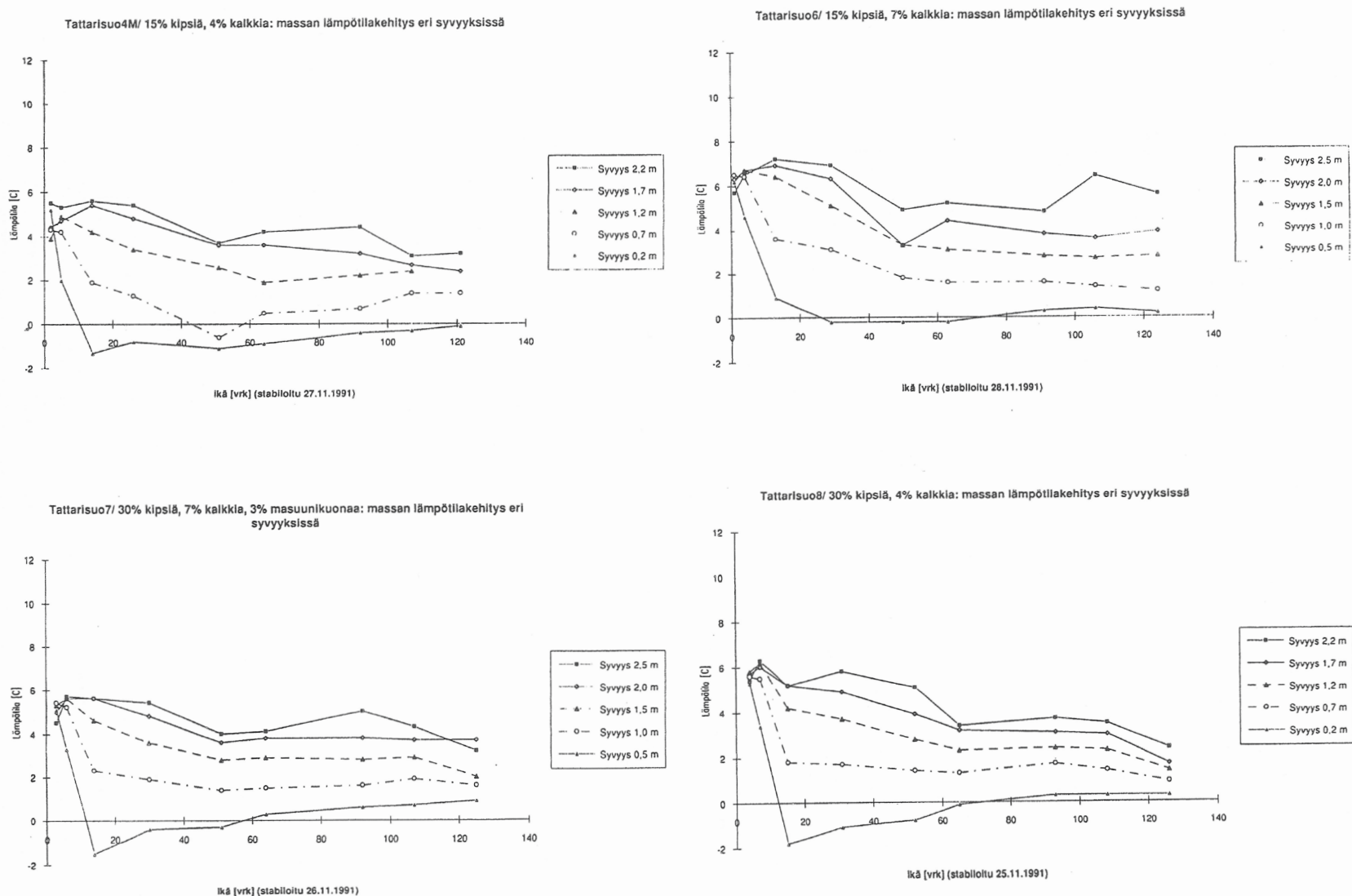
*toimitetaanko aina/pyydetessä jännitys-muodonmuutoskuvaajat tai niitä vastaava data?

*ilmoitetaanko tulokset 2 tai 3 merkitsevällä numerolla, vai kokonaisina kilopascaleina?

Muuta?

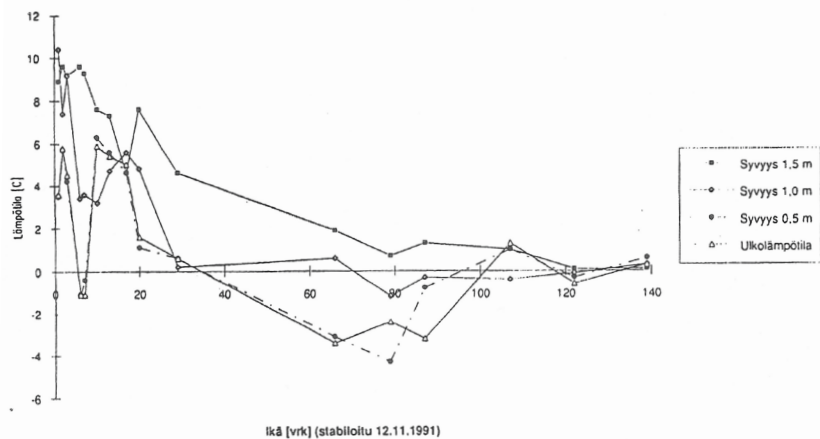
*ajatuksia, ehdotuksia?

Lämpötilan kehitys pitkällä aikavälillä

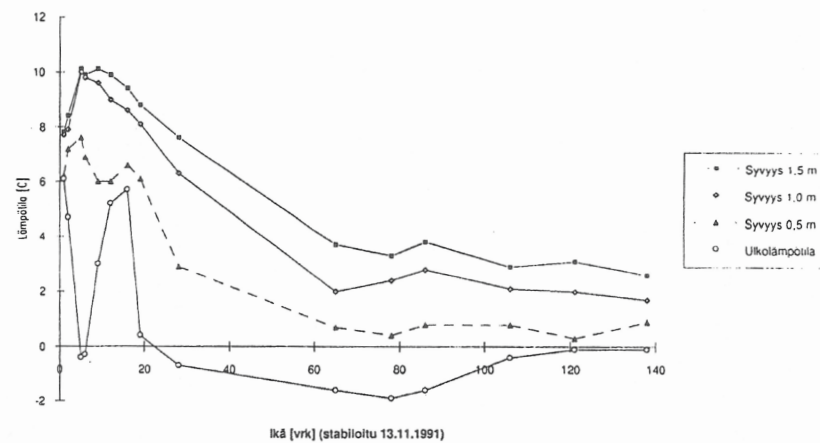


Koemassojen lämpötilakehitys Herttoniemessä sekä Tattarisuon massassa. (Karlstedt, P. ja Halkola, H).

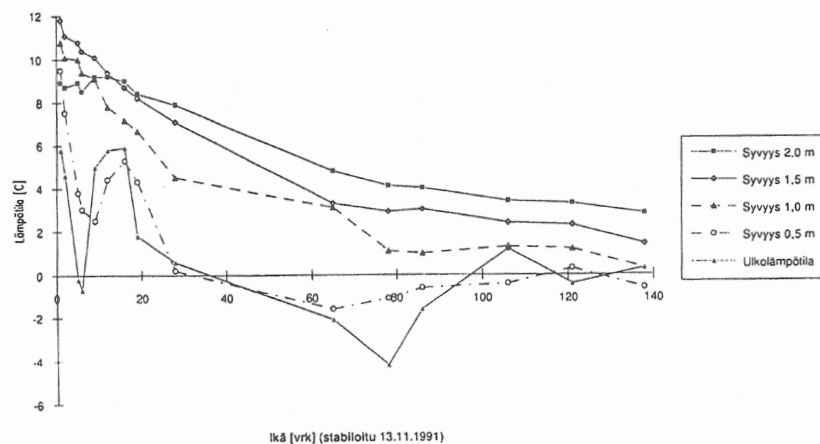
Herttoniemi1/ 33% kipsiä, 7,6% kalkkia: massan lämpötilakehitys eri syvyyksissä



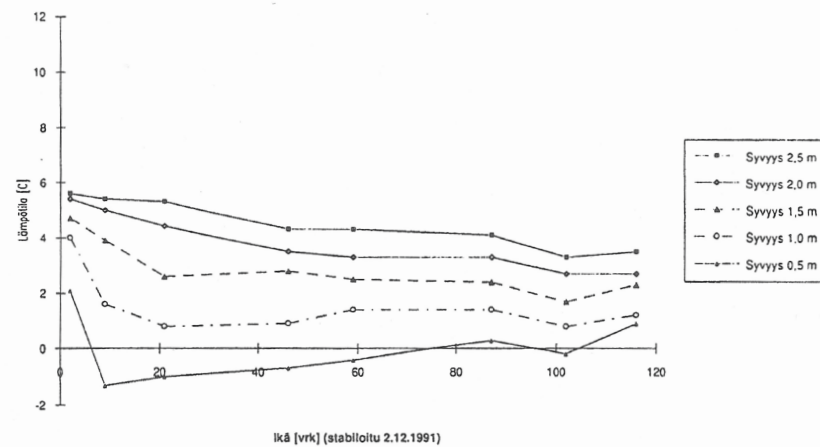
Herttoniemi2/ 30% kipsiä, 6,6% sementtiä: massan lämpötilakehitys eri syvyyksissä



Herttoniemi3/ 4,5% kalkkia, 3% kuonaa: massan lämpötilakehitys eri syvyyksissä

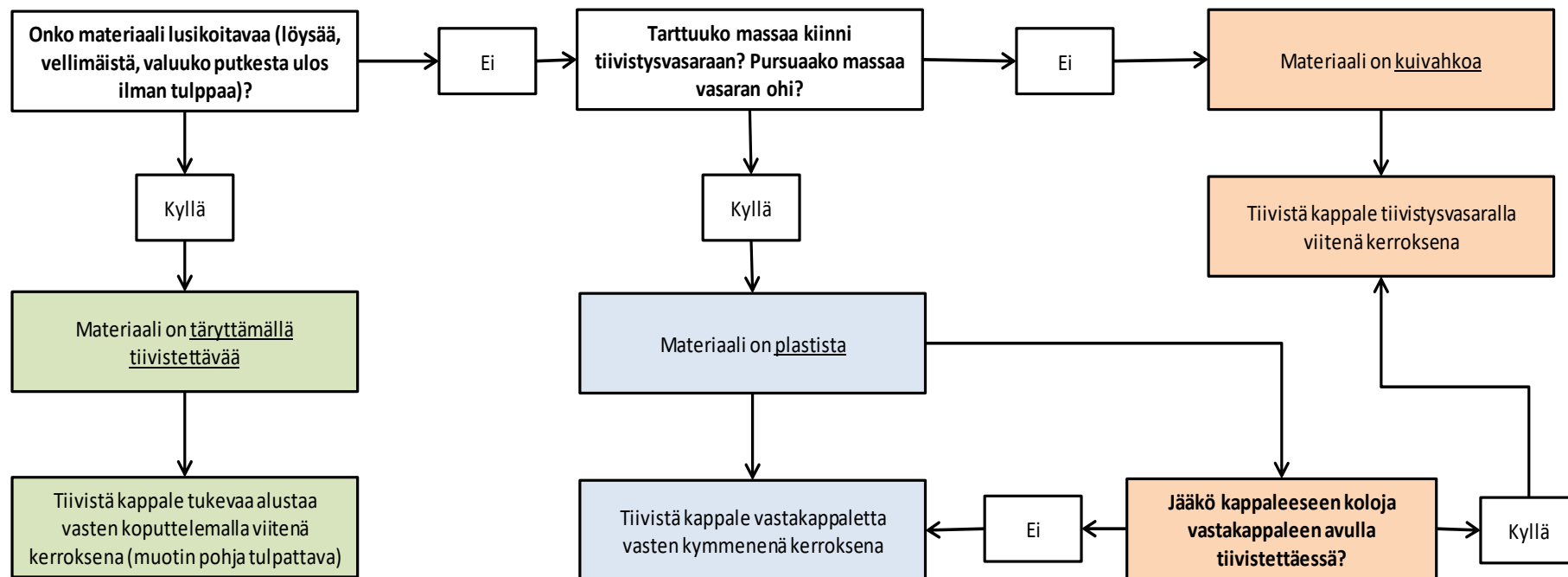


Tattarisuo3/ 30% kipsiä, 7% sementtiä: massan lämpötilakehitys eri syvyyksissä



Koemassojen lämpötilakehitys Tattarisuon koemassoissa 4-8. (Karlstedt, P. ja Halkola, H).

Kaavio tiivistystavan valinnalle



ISSN-L 1798-6656
ISSN 1798-6664
ISBN 978-952-317-552-5
www.liikennevirasto.fi

Liik
enne
vira
sto